

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
Направление подготовки (специальность) 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»
Кафедра систем управления и мехатроники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Разработка стенда ПИД-регулятора для модели нефтепромысла
УДК 622.276.002:681.515.8.018.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т31	Селивёрстов Павел Андреевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры СУМ	Рудницкий В. А.	Кандидат технических наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры МЕН	Спицын В. В.	Кандидат экономических наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Пустовойтова М. И.	Кандидат химических наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры СУМ	Губин В. Е.	Кандидат технических наук		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Демонстрировать базовые естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств. Уметь сочетать теорию, практику и методы для решения инженерных задач, и понимать область их применения
P2	Иметь осведомленность о передовом отечественном и зарубежном опыте в области теории, проектирования, производства и эксплуатации систем автоматизации технологических процессов и производств.
P3	Применять полученные знания для определения, формулирования и решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных систем автоматизации технологических процессов и производств с использованием передовых научно–технических знаний и достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.
P4	Уметь выбирать и применять соответствующие аналитические методы и методы проектирования систем автоматизации технологических процессов и обосновывать экономическую целесообразность решений.
P5	Уметь находить необходимую литературу, базы данных и другие источники информации для автоматизации технологических процессов и производств.
P6	Уметь планировать и проводить эксперимент, интерпретировать данные и их использовать для ведения инновационной инженерной деятельности в области автоматизации технологических процессов и производств.
P7	Уметь выбирать и использовать подходящее программно–техническое оборудование, оснащение и инструменты для решения задач автоматизации технологических процессов и производств.
<i>Универсальные компетенции</i>	
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за риски и работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации технологических процессов и производств, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам
P10	Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду.
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
Направление подготовки (специальность) 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»
Кафедра систем управления и мехатроники

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

(Подпись) _____ (Дата) Губин В. Е.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
8Т31	Селивёрстову Павлу Андреевичу

Тема работы:

Разработка стенда ПИД-регулятора для модели нефтепромысла	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследования: обучающий стенд ПИД-регулятора. Цель работы: разработка стенда ПИД-регулятора. Проектируемый стенд содержит 2 вида ПИД-регуляторов и 2 вида объектов управления
---------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Блок схема стенда; Передаточная функция и принципиальная схема аналогового электрического объекта управления; Схема аналогового ПИД-регулятора; Схема модуля ШИМ-питания для механического объекта управления; Механический объект управления, как трехмассовый объект; Математическая модель механического объекта управления; Библиотека дискретного ПИД-регулятора;
Перечень графического материала	Принципиальная схема аналогового ПИД-регулятора; Принципиальная схема модуля ШИМ-питания; Чертеж соединительных втулок;
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицын Владислав Владимирович
Социальная ответственность	Пустовойтова Марина Игоревна

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры СУМ	Рудницкий Владислав Александрович	Кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т31	Селивёрстов Павел Андреевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работы содержит 84 страницы машинописного текста, 16 таблиц, 26 рисунков, 1 список использованных источников из 20 наименований, 3 приложения, 1 альбом графической документации.

Объектом исследования является стенд ПИД-регулятора.

Цель работы – разработка стенда ПИД-регулятора.

В данной работе была разработана блок схема стенда, передаточная функция и принципиальная схема аналогового электрического объекта управления, схема аналогового ПИД-регулятора, схема модуля ШИМ-питания МехОУ, библиотека дискретного ПИД-регулятора, а также описаны этапы моделирования и реального получения механического объекта управления в виде трехмассового объекта.

Данный стенд может применяться для обучения специалистов профильных специальностей в сфере автоматике учебными заведениями. Данный стенд позволит увеличить уровень профессиональных компетенций, получаемых студентами.

Выпускная квалификационная работа выполнена с помощью текстового редактора Microsoft Word 2010, редактора схем Multisim, пакета прикладных программ MATLAB&Simulink, и симулятора электрических схем Proteus.

Ниже представлен перечень ключевых слов.

ПИД-РЕГУЛЯТОР, НАЙСТРОЙКА ПИД-РЕГУЛЯТОРА, СТЕНД ИЗУЧЕНИЯ ПИД-РЕГУЛЯТОРА, ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ, ТРЕХМАССОВЫЙ ОБЪЕКТ, БИБЛИОТЕКА ПИД-РЕГУЛЯТОРА.

Оглавление

Глоссарий.....	9
1. Техническое задание.....	14
1.1 Назначение стенда.....	14
1.2 Возможности стенда	14
1.3 Технические характеристики.....	14
1.3.1 Размер	14
1.3.2 Дизайн	14
1.3.3 Состав	15
1.3.4 Электропитание.....	15
2. Основная часть	16
2.1 Блок схема стенда	16
2.2 Аналоговый электрический объект управления.....	16
2.2.1 Синтез передаточной функции аналогового электрического объекта управления	16
2.2.2 Разработка электрической принципиальной схемы аналогового электрического объекта управления	19
2.3 Разработка схемы аналогового ПИД-регулятора	20
2.4 Моделирование процесса работы схемы	21
2.5 Тестирование аналогового ПИД-регулятора и АЭОУ	22
2.6 Разработка схемы модуля ШИМ-питания механического ОУ	24
2.7 Механический объект управления	25
2.7.1 Получение математической модели МехОУ.....	27
2.7.1.1 Получение операторно-структурной схемы модели	28
2.7.2 Моделирование МехОУ	30
2.8 Дискретный ПИД-регулятор.....	33
2.8.1 Актуальность разработки библиотеки	33
2.8.2 Непосредственная реализация алгоритма ПИД-регулирования.....	34
2.8.3 Подходы к разработке качественного алгоритма ПИД-регулятора.....	35
2.8.3.1 Частота вычисления закона управления.....	35
2.8.3.2 Учет нелинейности типа «ограничение»	36

2.8.3.3 Выбросы от дифференциальной составляющей	37
2.8.3.4 Выбросы от интегральной составляющей	37
2.8.4 Описание разработанной библиотеки	38
2.8.5 Тестирование разработанной библиотеки	40
2.8.5.1 Общие подходы	40
2.8.5.2 Тестирование с объектом управления первого порядка	41
2.8.5.3 Демонстрация целесообразности использованных подходов ..	44
2.8.5.3.1 Нелинейность типа «ограничение»	44
2.8.5.3.2 Выбросы от дифференциальной составляющей	45
2.8.5.3.3 Выбросы от интегральной составляющей	46
2.9 Результаты и перспективы разработки стенда ПИД-регулятора	47
3. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	50
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования	50
3.2 Анализ конкурентных технических решений	50
3.3 Технология QuaD	53
3.4 SWOT-анализ	54
4. Планирование научно-исследовательских работ	56
4.1 Структура работ в рамках научного исследования	56
4.2 Определение трудоемкости выполнения работ	57
4.3 Разработка графика проведения научного исследования	60
4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	61
4.4.1 Расчет материальных затрат НТИ	62
4.4.2 Основная заработная плата исполнителей темы	63
4.4.3 Дополнительная заработная плата	64
4.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	65
4.4.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	66
4.4.6 Определение ресурсной, финансовой и экономической эффективности исследования	66
5. Социальная ответственность	70

5.1 Производственная безопасность	71
5.2 Требования к ВДТ	71
5.3 Микроклимат производственных помещений	71
5.4 Производственный шум	72
5.5 Электромагнитные и электрические поля	73
5.6 Ионизирующее излучение.....	74
5.7 Электробезопасность	75
5.8 Экологическая безопасность.....	76
5.9 Пожарная безопасность	78
5.10 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ...	80
Заключение	82
Список используемых источников.....	83
Приложение А Заголовочный файл библиотеки	86
Приложение Б Основной файл с реализацией библиотеки	87
Приложение В Пример основной программы для AVR МК ATmega16a.....	89

Глоссарий

<i>Термин</i>	<i>Определение</i>
Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП)	Комплекс программных и технических средств, предназначенный для автоматизации управления технологическим оборудованием на предприятиях. Под АСУ ТП обычно понимается комплексное решение, обеспечивающее автоматизацию основных технологических операций на производстве в целом или каком-то его участке, выпускающем относительно завершённый продукт;
Объект управления	Обобщающий термин кибернетики и теории автоматического управления, обозначающий устройство или динамический процесс, управление поведением которого является целью создания системы автоматического управления;
Переходная функция	Реакция на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях объекта управления, характеризует динамические свойства ОУ;
Печатная плата	Пластина из диэлектрика, на поверхности и/или в объёме которой сформированы электропроводящие цепи электронной схемы;
ПИД-регулятор	Устройство, используемое в системах автоматического управления для поддержания заданного значения измеряемого параметра. ПИД-регулятор измеряет отклонение стабилизируемой величины от заданного значения (уставки) и выдаёт управляющий сигнал, являющийся суммой трёх слагаемых, первое из которых пропорционально

	<p>этому отклонению, второе пропорционально интегралу отклонения и третье пропорционально производной отклонения;</p>
<p>Программируемый логический контроллер (ПЛК)</p>	<p>Специализированное компьютеризированное устройство, используемое для автоматизации технологических процессов. ПЛК имеют развитые устройства ввода-вывода сигналов датчиков и исполнительных механизмов, приспособлены для длительной работы без серьезного обслуживания, а также для работы в неблагоприятных условиях окружающей среды. ПЛК являются устройствами реального времени;</p>
<p>Стандарт</p>	<p>Образец, эталон, модель, принимаемые за исходные для сопоставления с ними др. подобных объектов. Стандарт в Российской Федерации – документ, устанавливающий комплекс норм, правил, требований к объекту стандартизации, в котором в целях добровольного многократного использования устанавливаются характеристики продукции, правила осуществления и характеристики процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг;</p>
<p>Техническое задание на АС (ТЗ)</p>	<p>Утвержденный в установленном порядке документ, определяющий цели, требования и основные исходные данные, необходимые для разработки автоматизированной системы;</p>
<p>Технологический процесс (ТП)</p>	<p>Последовательность технологических операций, необходимых для выполнения определенного вида</p>

	<p>работ. Технологический процесс состоит из рабочих операций, которые в свою очередь складываются из рабочих движений;</p>
<p>ФЮРА. 421212.010</p>	<p>ФЮРА – это код организации разработчика проекта (ТПУ); 421212 – это код классификационной характеристики проектной продукции по ГОСТ 3.1201-85 (Устройства и системы контроля и регулирования параметров технологических, процессов);</p>
<p>Широтно-импульсная модуляция</p>	<p>Процесс управления мощностью, подводимой к нагрузке, путём изменения скважности импульсов, при постоянной частоте.</p>

Обозначения и сокращения

Аббревиатура	Краткая характеристика
АЭОУ	Аналоговый электрический объект управления
ДПТ	Двигатель постоянного тока
МехОУ	Механический объект управления
ОСС	Операторно-структурная схема
ОУ	Объект управления
ПИД	Пропорционально-интегрально-дифференциальный
ПК	Персональный компьютер
ПЛК	Программируемый логический контроллер
ПП	Переходный процесс
ППП	Пакет прикладных программ
ПФ	Передаточная функция
САР	Система автоматического регулирования
САУ	Система автоматического управления
ТАУ	Теория автоматического управления

Введение

В настоящее время существует проблема обучения персонала в сфере автоматике, связанная с отсутствием необходимой образовательной материальной базы. В частности, обучение навыкам натурной настройки ПИД-регуляторов [3]. Простота структуры и промышленного использования, ясность принципа функционирования, пригодность для решения большинства практических задач, и невысокая стоимость [2], сделали пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор одним из наиболее распространенных типов регуляторов.

Регуляторы применяются в системах автоматического управления (САУ) для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса [1]. Данные параметры определяют то, насколько быстро происходит выход системы в установившийся режим работы и как велико при этом перерегулирование во время переходного процесса (ПП), что в итоге определяет качество получаемого продукта и затраты на его производство. Несмотря на высокую распространенность ПИД-регуляторов, не существует универсального метода их настройки. Моделирование работы ПИД-регулятора с объектом управления (ОУ) и теория часто не учитывают особенностей, которые имеют место быть в реальных условиях применения и технической реализации. Таким образом, для студентов профильных специальностей является необходимым изучение ПИД-регуляторов на реальной элементной базе и освоение навыков их «живой» настройки, прежде чем перед ними встанут такие задачи на производстве

Целью выполнения выпускной квалификационной работы является разработка стенда ПИД-регулятора, который позволил бы повысить уровень профессиональных компетенций, приобретаемых обучающимися в сфере автоматике.

1. Техническое задание

1.1 Назначение стенда

Стенд ПИД-регулятора должен быть предназначен для обучения студентов профильных специальностей в сфере автоматике навыкам натурной настройки ПИД-регуляторов.

1.2 Возможности стенда

Стенд должен предоставлять следующие возможности:

- Выбор типа ПИД-регулятора (дискретный или аналоговый);
- Выбор типа объекта управления (механический или аналоговый электрический);
- Подключение осциллографа между любыми основными модулями стенда;
- Изменение значений пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-регуляторов;
- Одновременное наблюдение на осциллографе изменений переходной характеристики при изменении коэффициентов составляющих ПИД-регуляторов;

1.3 Технические характеристики

1.3.1 Размер

Стенд должен быть собран на единой платформе размером не более 500x400 мм.

1.3.2 Дизайн

Предусмотреть на платформе стенда текстовую информацию о наименовании каждого, расположенного на ней, модуля. А также информацию о переподключении модулей стенда. Возможно расположение графической информации.

1.3.3 Состав

В состав стенда должны входить: источник задающего воздействия; аналоговый ПИД-регулятор; дискретный ПИД-регулятор на микроконтроллере; аналоговый электрический объект управления третьего порядка; механический объект управления (МехОУ), представляющий собой трехмассовый объект; а также модуль ШИМ-питания для МехОУ.

1.3.4 Электропитание

Питание осуществляется постоянным напряжением. Напряжение электропитания – 12 В.

2. Основная часть

2.1 Блок схема стенда

К основной функции разрабатываемого стенда относится отработка навыков натурной настройки ПИД-регулятора, что значит наличие способности изменения значений любого из коэффициентов ПИД-регулятора пропорциональной, интегральной и дифференциальной части. При этом есть необходимость одновременного наблюдения на осциллографе изменения переходной характеристики объекта управления. Отсюда делаем вывод, что стенд должен состоять из следующих частей: ОУ, охваченного обратной связью, источника задающего воздействия и ПИД-регулятор (рисунок 1).



Рисунок 1 – Блок-схема разрабатываемой системы

2.2 Аналоговый электрический объект управления

2.2.1 Синтез передаточной функции аналогового электрического объекта управления

В данном разделе рассмотрим получение передаточной функции (ПФ) аналогового электрического объекта управления (АЭОУ). Основное требование к ПФ АЭОУ – это приближенность к ПФ реальных объектов управления, которые используются в промышленности и вызывают трудности в настройке. Обычно, большинство промышленных ОУ с практической точки зрения достаточно точно описываются передаточной функцией второго порядка [2]. В связи с этим, для систем включительно до второго порядка разработано большое количество методов настройки ПИД-регуляторов. Методы настройки проработаны до высокого уровня и не вызывают значительных вычислительных сложностей. Сложности вызывает

натурная настройка регуляторов, управляющих ОУ, ПФ которых описывается более высоким порядком, чем второй. Отсюда, принято решение использовать в качестве ПФ АЭОУ устойчивое звено 3-го порядка. Таким образом, передаточная функция аналогового электрического объекта управления стенда имеет вид:

$$W(s) = \frac{1}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}, \quad (1)$$

где s – комплексная переменная, a_3, a_2, a_1 – коэффициенты, которые будут установлены исходя из требований к переходному процессу (ПП). Переходный процесс АЭОУ должен характеризоваться ярко-выраженной колебательностью с перерегулированием $\sigma=60-80\%$, для наглядной демонстрации его последующего регулирования. Время ПП $t_{\text{пп}} = 40$ мс выбрано исходя из удобства наблюдения на осциллографе. Значения коэффициентов a_i в уравнении (1) выбираются по алгоритму [4] таким образом, чтобы характеристики ПП удовлетворяли требуемым значениям времени ПП и перерегулирования. В соответствии с данным алгоритмом, коэффициенты уравнения (1) принимаются равными:

$$a_2 = T^2; a_1 = 2\delta T, \quad (2)$$

где δ – декремент затухания, T – постоянная времени. Известно, что переходный процесс будет колебательным, если декремент $\delta < 0,5$. Для выбора подходящего значения возьмем несколько значений: $\delta_1=0,1$; $\delta_2=0,2$; $\delta_3=0,3$. Далее, по приближенному равенству находятся $T_i = \frac{(\delta_i t_{\text{пп}})}{3}$ и для различных δ определяются коэффициенты a_1 и a_2 по уравнениям (2). Коэффициент a_3 находится из условия

$$a_3 < a_2 a_1, \quad (3)$$

Данное условие (3) не является строго достаточным условием устойчивости, но на практике во многих случаях, используется для

выявления устойчивых систем [5]. Соблюдая неравенство (3), найдем a_3 по формуле: $a_3 = a_2 a_1 / 10$.

Таким образом, для разных значений декремента затухания δ получим три ПФ с коэффициентами, представленными в таблице 1.

Таблица 1– Коэффициенты ПФ

ПФ\Параметр	δ	a_3	a_2	a_1
W_1	0,1	$4,74 \cdot 10^{-11}$	$1,78 \cdot 10^{-6}$	$2,67 \cdot 10^{-4}$
W_2	0,2	$7,58 \cdot 10^{-10}$	$7,11 \cdot 10^{-6}$	$1,067 \cdot 10^{-3}$
W_3	0,3	$3,84 \cdot 10^{-9}$	$16 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$

Далее производится получение переходной характеристики полученных ПФ в пакете прикладных программ MATLAB&Simulink (рисунок 2). В результате моделирования видно, что полученные ПФ имеют время ПП, близкое к желаемому $t_{пп} = 40$ мс, и перерегулирование наиболее колебательного процесса не превышает 80%. Для большей наглядности процесса регулирования при настройке ПИД-регулятора выбирается ПФ, имеющая наибольшую степень колебательности.

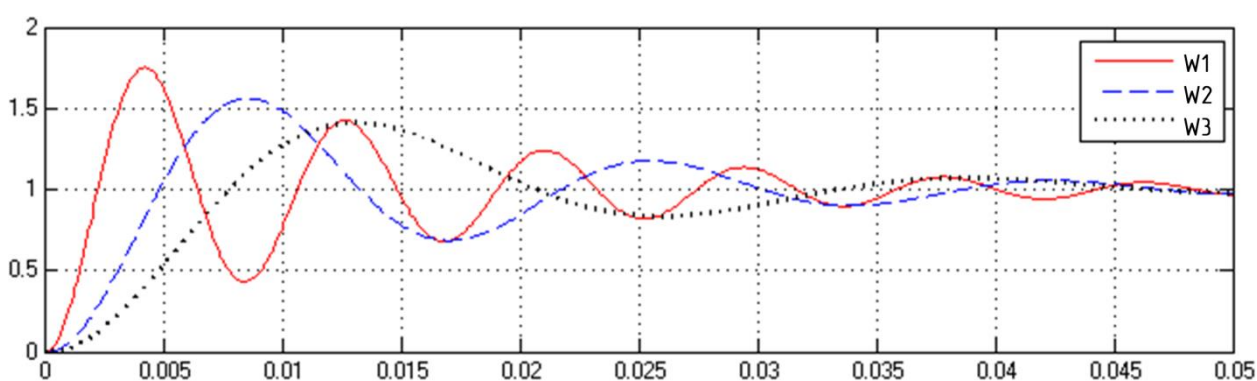


Рисунок 2 – Переходные характеристики найденных ПФ при $\delta=0.1$ (—); $\delta=0.2$ (- -); $\delta=0.3$ (···). Масштаб: X – 5 мс /дел; Y – 0.5 ед /дел

Выбранная ПФ имеет вид:

$$W(s) = \frac{1}{4.74 \cdot 10^{-11} s^3 + 1.78 \cdot 10^{-6} s^2 + 2.67 \cdot 10^{-7} s + 1}. \quad (4)$$

2.2.2 Разработка электрической принципиальной схемы аналогового электрического объекта управления

Для реализации желаемой ПФ (4) на пассивных элементах и операционных усилителях необходимо произвести разложение выражения (4) на сомножители первого и второго порядков:

$$W(s) = \frac{1}{2.676 \cdot 10^{-5}s+1} \cdot \frac{1}{1.771 \cdot 10^{-6} \cdot s^2 + 2.399 \cdot 10^{-4}s+1} = W_1(s) \cdot W_2(s). \quad (5)$$

Передаточные функции каждого из полученных сомножителей реализовываются по отдельности, как два каскада первого и второго порядков. Схема каскада первого порядка – простейшее апериодическое звено 1-го порядка на операционном усилителе. Данная схема представлена на рисунке 3.

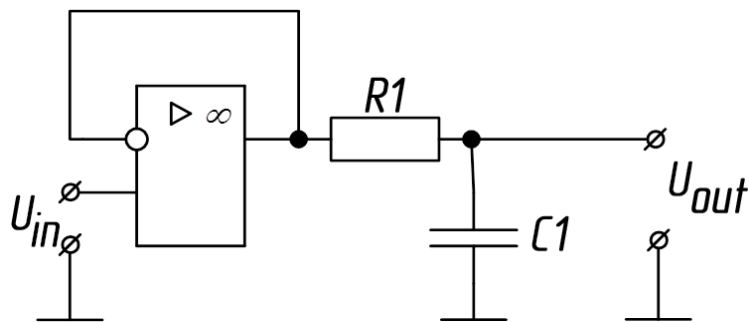


Рисунок 3 – Принципиальная схема каскада первого порядка

Параметры элементов получим из следующего условия:

$$W_1(s) = \frac{1}{R_1 C_1 s + 1} \equiv \frac{1}{2.676 \cdot 10^{-5}s + 1}.$$

Зафиксируем емкость конденсатора $C_1=1$ нФ и получим значение резистора $R_1=2,7 \cdot 10^{-5}/C_1 = 27$ кОм.

Схема каскада второго порядка (рисунок 4) представляет собой фильтр Баттерворта с топологией Саллена-Кея [6].

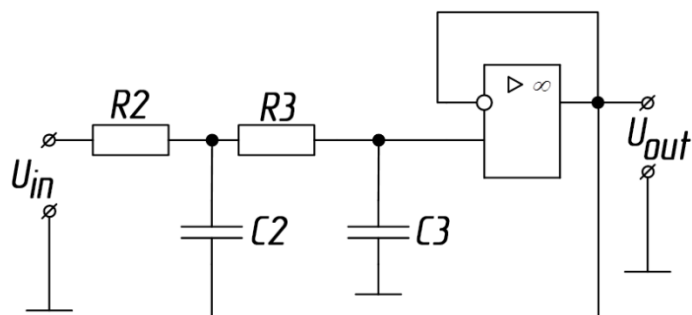


Рисунок 4 – Принципиальная схема каскада второго порядка

Параметры компонентов находятся из условия:

$$W_2(s) = \frac{1}{C_2 C_3 R_2 R_3 s^2 + C_3 (R_2 + R_3) s + 1}$$

$$\equiv \frac{1}{1.771 \cdot 10^{-6} s^2 + 2.399 \cdot 10^{-4} s + 1}$$

Выберем номиналы второго и третьего резисторов $R_2=R_3=250$ кОм, находим $C_2=0.48$ нФ, $C_3=60$ нФ. В итоге получаем, что принципиальная схема АЭОУ имеет вид, представленный на рисунке 5. Найденные значения пассивных элементов сводятся к номиналам из стандартных рядов значений компонентов, выпускаемых промышленностью серийно.

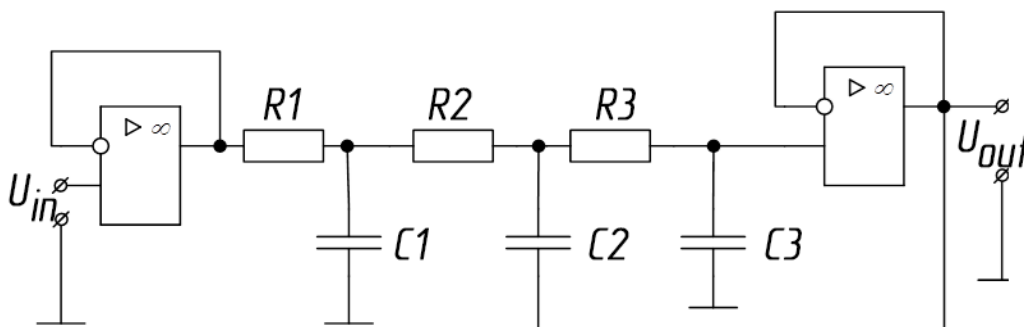


Рисунок 5 – Принципиальная схема АЭОУ

2.3 Разработка схемы аналогового ПИД-регулятора

Согласно с разделом 1.2 технического задания в стенде должна быть предусмотрена возможность наблюдать во времени изменение переходной характеристики объекта управления в зависимости от значений пропорциональной, интегральной, и дифференциальной составляющих ПИД-регулятора. Для предоставления такой возможности аналоговый ПИД-регулятор будет реализован на отдельных звеньях, которые соответствуют

трем составляющим, а их выходные сигналы просуммированы. При этом в каждом звене будет присутствовать элемент, позволяющий изменять соответствующую составляющую. Разработанная схема аналогового ПИД-регулятора представлена на рисунке 6. Каждое звено ПИД-регулятора, а также усиливающий сумматор реализованы на операционных усилителях. При этом каждое из звеньев имеет в своем составе переменное сопротивление, которое будет использовано для настройки ПИД-регулятора в режиме реального времени. Моделирование полученной схемы выполнено в программной среде Multisim, а номинальные значения элементов выбраны таким образом, чтобы существовала возможность обеспечения качественного регулирования системы, а также возможность вывода системы в неустойчивое состояние.

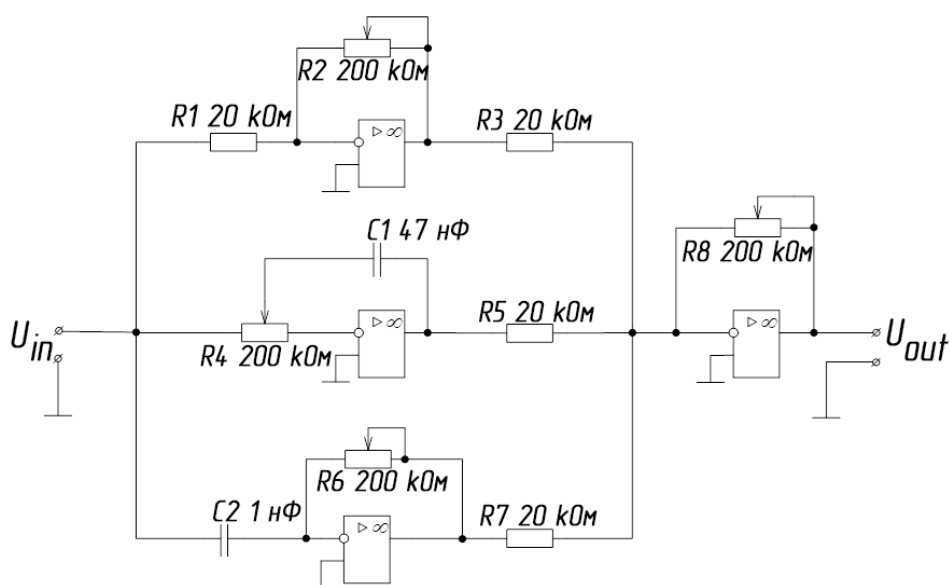


Рисунок 6 – Принципиальная схема ПИД-регулятора

2.4 Моделирование процесса работы схемы

Полученные части стенда соединяются по блок-схеме, изображенной ранее на рисунке 1, где в качестве сумматора и одновременно коэффициента усиления обратной связи используется вычитающий усилитель на операционном усилителе. Полученная схема собирается в программной среде Multisim и производится проверка работоспособности полученных схем путём моделирования. При моделировании вычисляется временной отклик

объекта управления при различных коэффициентах составляющих ПИД-регулятора. Формы сигнала на выходе объекта управления и сумматора (ошибка управления) для одной из настроек ПИД-регулятора представлены на рисунке 7.



Рисунок 7 – Формы сигнала на выходе АЭОУ (красная кривая) и сумматора (зеленая кривая), полученные в Multisim. Масштаб: X – 20 мс/дел, Y – 10 В/дел.

2.5 Тестирование аналогового ПИД-регулятора и АЭОУ

Для проверки спроектированной схемы производится ее сборка на макетной печатной плате. В качестве генератора задающего воздействия используется функциональный генератор напряжения, а в качестве источника питания схемы – стационарный источник постоянного напряжения. Для получения временных диаграмм напряжения используется цифровой осциллограф.

Сначала отдельно собирается схема АЭОУ. На его вход подается прямоугольный сигнал, снимается переходная характеристика (рисунок 8а). Для сравнения форм сигнала, полученных при эксперименте и моделировании, они строятся в одной системе координат (рисунок 8б). Видно, что полученные формы сигнала практически совпадают, незначительное их различие вызвано погрешностью параметров в цепи.

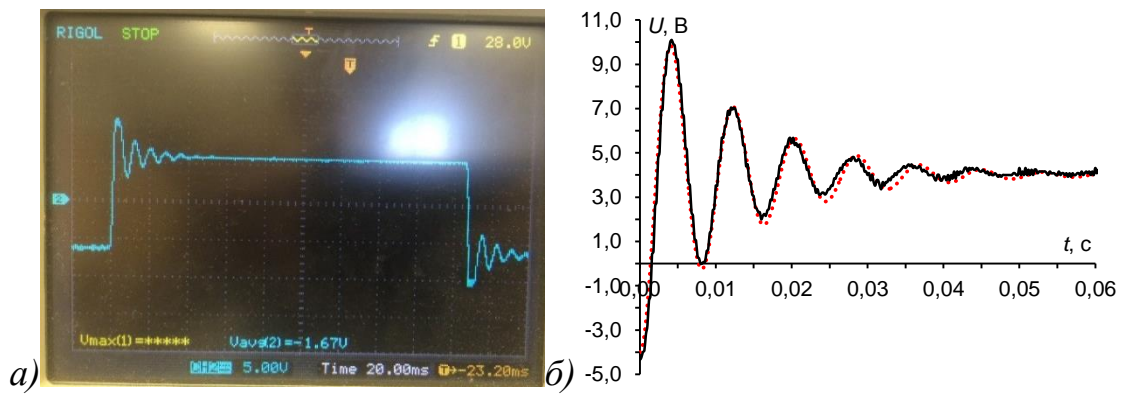


Рисунок 8 – Тестирование схемы ОУ:

а) форма сигнала на выходе ОУ.

б) Сравнение форм сигнала на выходе ОУ в моделировании (···) и эксперименте (—)

Далее на макетной плате собирается полная схема согласно блок-схеме (рисунок 1): АЭОУ охватывается отрицательной обратной связью, в прямую цепь добавляется ПИД-регулятор. Проверяется возможность получения различного характера переходного процесса: при прежней форме входного воздействия снимаются формы сигнала на выходе АЭОУ при различных комбинациях коэффициентов ПИД-регулятора. В таблице 2 представлены значения сопротивлений схемы и соответствующие им абсолютные значения составляющих ПИД-регулятора (каждая строка таблицы 2 соответствует одной комбинации коэффициентов). Формы сигналов для каждой комбинации представлены на рисунке 9 а-г.

Таблица 2 – Значения сопротивлений и соответствующие им значения П-, И- и Д- составляющих.

№	$R_2, Ом$	$R_4, Ом$	$R_6, Ом$	П	И	Д
1	$20 \cdot 10^3$	$1.94 \cdot 10^5$	$1.77 \cdot 10^5$	1	$1.1 \cdot 10^2$	$9 \cdot 10^{-5}$
2	5.5	$1.94 \cdot 10^5$	$1.77 \cdot 10^5$	$2.75 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^2$	$9 \cdot 10^{-5}$
3	$1.35 \cdot 10^5$	$3.45 \cdot 10^4$	$1.77 \cdot 10^5$	6.75	$6.17 \cdot 10^2$	$9 \cdot 10^{-5}$
4	0	$2.17 \cdot 10^4$	$1.77 \cdot 10^5$	0	$9.80 \cdot 10^2$	$9 \cdot 10^{-5}$

Первый ПП (рисунок 9а) получен для единичного коэффициента пропорциональной (П) составляющей, и при минимальной интегральной (И) и максимальной дифференциальной (Д) составляющих: такая комбинация дала на выходе нулевое перерегулирование и ярко-выраженный колебательный характер. В следующем опыте (рисунок 9б) на несколько

порядков уменьшена П-составляющая, что уменьшило степень колебательности ПП.

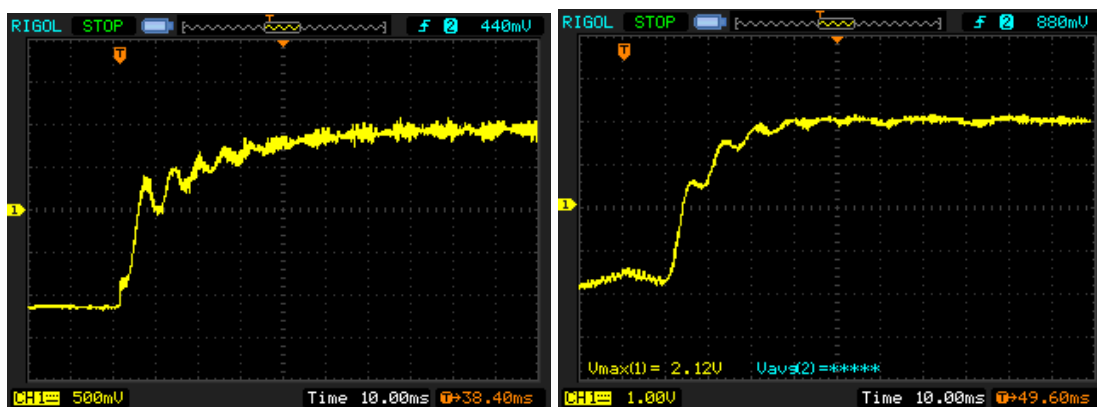


Рисунок 9 а,б – Экспериментальная форма сигнала на выходе АЭОУ

В третьем опыте (рисунок 9в) увеличены П- и И- составляющие, что привело к получению колебательного ПП с перерегулированием. В четвертом опыте продемонстрирована возможность вывода системы в неустойчивое состояние (рисунок 9г).

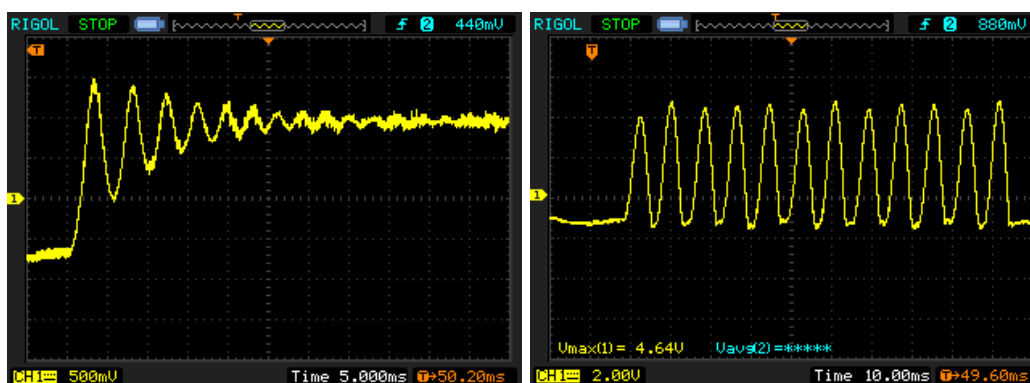


Рисунок 9 в,г – Экспериментальная форма сигнала на выходе АЭОУ

2.6 Разработка схемы модуля ШИМ-питания механического ОУ

Данный модуль необходим для организации питания механического объекта управления в режиме широтно-импульсной модуляции. Решено реализовать модуль ШИМ-питания без использования микропроцессоров, так как их использование не совсем целесообразно, следовательно, данный модуль выполнен на аналоговых электронных компонентах.

Принцип работы данного модуля заключается в том, что скважность ШИМ-режима выходного напряжения изменяется в зависимости от

полученного сигнала с регулятора. Схема модуля ШИМ-питания состоит из 3 основных блоков: генератор пилообразного сигнала; формирователь сигнала, пропорционального уровню сигнала с регулятора; компаратор с выходной цепью. В компараторе происходит сравнение пилообразного сигнала и сигнала пропорционального уровню сигнала с регулятора. В результате сравнения на выходе коммутируется нагрузка MOSFET транзистором в режиме широтно-импульсной модуляции. Схема модуля ШИМ-питания представлена на рисунке 10.

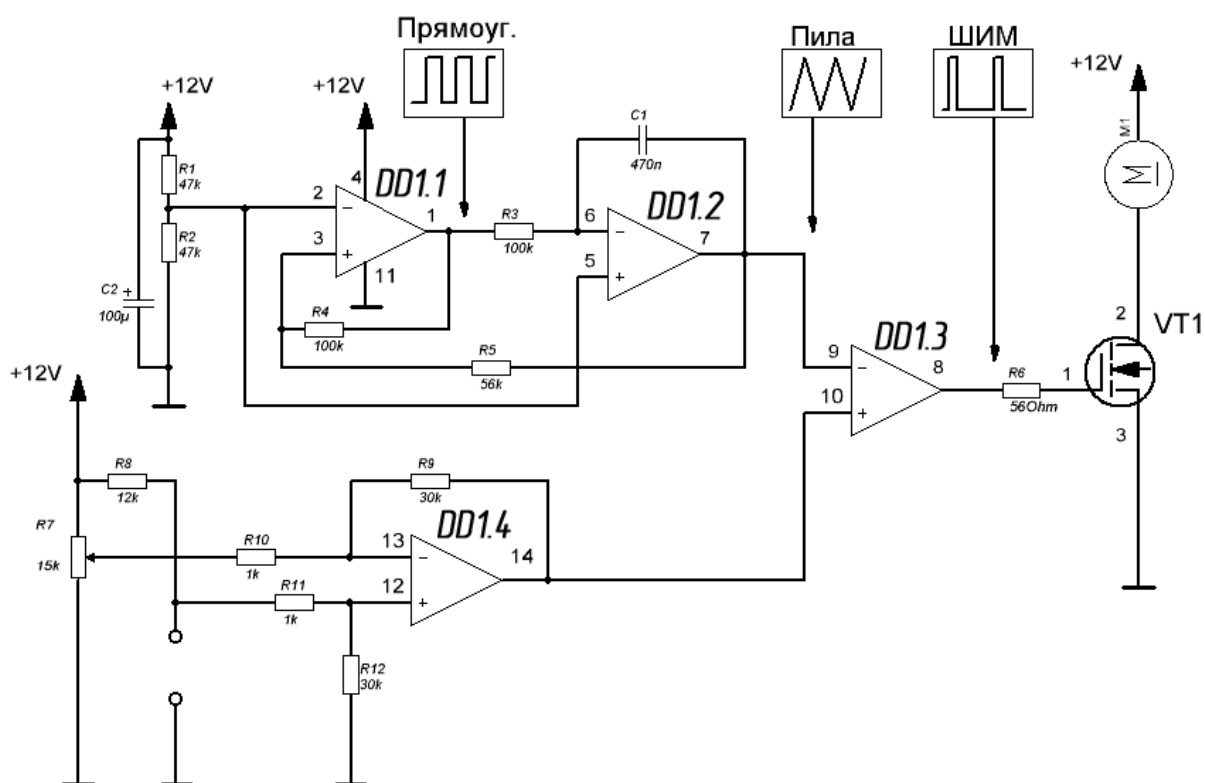


Рисунок 10 – Схема модуля ШИМ-питания

2.7 Механический объект управления

В состав данного ОУ входят: 2 двигателя постоянного тока (ДПТ), 1 из которых будет работать в двигательном режиме (далее – двигатель), а другой – в генераторном (далее – генератор); 2 дисков-инерционностей, представляющих нагрузку данного объекта управления; соединительных пружин между дисками и двигателями.

Механический объект управления (МехОУ) представляет собой объект третьего порядка, также называемый как трехмассовый объект. Сигнал управления, подаваемый с ПИД-регулятора через модуль ШИМ-питания на двигатель, инициирует вращение вала двигателя, однако вращение не может моментально передаться на генератор. Это связано с тем, что между двигателем и генератором располагаются пружины и стальные диски. Таким образом, сначала начинает скручиваться первая пружина, после чего начнет поворачиваться первый диск, скручивая вторую пружину, которая в свою очередь передаст вращение на второй диск. И только после прохождения всего этого пути начинает вращаться вал генератора. Переходный процесс будем фиксировать на выходе генератора.

Для реализации МехОУ потребовалось изготовить чертежи соединительных втулок, данные чертежи приведены в альбоме схем (лист 1). Далее потребовалось изготовить по полученным чертежам втулки для выходных валов генератора и двигателя. В данных втулках присутствует технологическое отверстие под стальную спицу, что дает нам центрирование осей выходных валов двигателя и генератора.

Для того, чтобы вращение с двигателя, на прямую через спицу не передавалось в генератор, в соединительной втулке на выходном валу генератора предусмотрено отверстие для подшипника, что дает нам механическую развязку вращения оси МехОУ и оставшейся конструкции.

Также для данного объекта управления были изготовлены 2 стальных диска, в которых предусмотрены отверстия для установки подшипников. Подшипники в дисках необходимы также как и в случае с втулкой на генераторе, для механической развязки вращения выходного вала двигателя, жестко соединенного с осью объекта управления, и остальной конструкции. Вследствие того, что масса дисков оказалась недостаточной, в каждом диске были дополнительно просверлены по 2 отверстия зеркально расположенных

относительно центра. В данные отверстия устанавливаются болт и пара гаек, которые увеличивают необходимую нам массу каждого из дисков.

Пружины подбирались исходя из их внутреннего диаметра, так как он должен быть больше чем внешний радиус подшипников, установленных в диски. Пружины устанавливаются на втулки в натяг и сверху для большей прочности всей конструкции фиксируются холодной сваркой. К дискам пружины крепятся парой болтов и гаек. В дисках предусмотрены технологические отверстия для установки пружины в диск и фиксации её маленьким болтом с гайкой.

В итоге, получается механический объект управления, в котором вся масса распределяется равномерно по спице, которая располагается между переходными втулками; вращение передается с двигателя в генератор только после прохождения трех пружин и двух инерционностей-дисков; вращение спицы разрознено от вращения дисков и пружин путём установки 3 подшипников.

2.7.1 Получение математической модели МехОУ

Механическим объектом управления является трехмассовый объект (рисунок 11). Трехмассовая система включает двигатель постоянного тока, который работает на нагрузку, состоящую из трех инерционностей, соединенных упруго-вязкими соединениями - пружинами. Первая из инерционностей – собственный приведенный момент инерции якоря J_d , вторая – момент инерции первого диска J_{m1} и третья – момент инерции второго диска J_{m2} . В нагрузках действует момент вязкого трения.

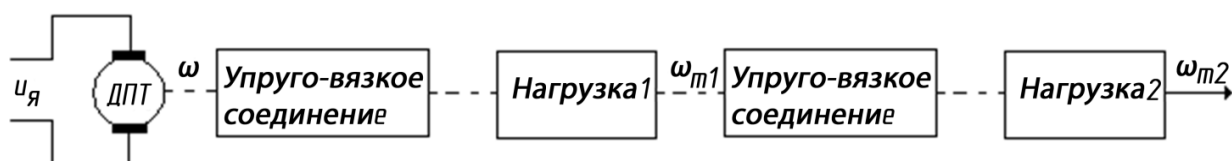


Рисунок 11 – Трехмассовый объект

Линеаризованная модель двигателя постоянного тока, без учета трения в подвесе якоря, описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$u_{\text{я}} = L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + c_e \omega;$$

$$J_d \frac{d\omega}{dt} = c_m i_{\text{я}} - M_{\text{н}}.$$

Здесь:

$R_{\text{я}}, L_{\text{я}}$ – параметры якорной цепи двигателя, J_d – приведенный момент инерции якоря, $i_{\text{я}}, u_{\text{я}}$ – ток и напряжение в якорной цепи, c_m, c_e – конструктивные параметры двигателя; $M_{\text{н}}$ – момент нагрузки, ω – угловая скорость якоря.

Линеаризованная модель трехмассовой механической системы описывается уравнениями для двигателя, нагрузок и соединительных валов:

$$M_{\text{н1}} = M_{\text{y1}}; \quad M_{\text{н2}} = M_{\text{y2}};$$

$$M_{\text{y1}} - M_{\text{y2}} - M_{\text{тр1}} = J_{m1} \frac{d\omega_{m1}}{dt}; \quad M_{\text{y2}} - M_{\text{тр2}} = J_{m2} \frac{d\omega_{m2}}{dt};$$

$$\frac{dM_{\text{y1}}}{dt} = c_{\varphi1}(\omega - \omega_{m1}); \quad \frac{dM_{\text{y2}}}{dt} = c_{\varphi2}(\omega_{m1} - \omega_{m2});$$

$$M_{\text{тр1}} = c_{\text{тр1}}\omega_{m1}; \quad M_{\text{тр2}} = c_{\text{тр2}}\omega_{m2}.$$

где $M_{\text{y1}}, M_{\text{y2}}$ – моменты упругих деформаций, $M_{\text{тр1}}, M_{\text{тр2}}$ – моменты вязкого трения, ω_{m1} – угловая скорость нагрузки (первого диска), ω_{m2} – угловая скорость нагрузки (второго диска) $c_{\varphi1}, c_{\varphi2}$ – жесткость соединительных валов, $c_{\text{тр1}}, c_{\text{тр2}}$ – коэффициент вязкого трения в каждом диске соответственно.

2.7.1.1 Получение операторно-структурной схемы модели

Используя исходные данные, запишем систему уравнений, описывающую рассматриваемую систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{\text{я}} = L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + c_e \omega \\ J_d \frac{d\omega}{dt} = c_m i_{\text{я}} - M_{\text{H}} \\ M_{\text{H1}} = M_{\text{y1}} \\ M_{\text{Тр1}} = c_{\text{Тр1}} \omega_{\text{m1}} \\ \frac{dM_{\text{y1}}}{dt} = c_{\varphi 1} (\omega - \omega_{\text{m1}}) \\ M_{\text{y1}} - M_{\text{y2}} - M_{\text{Тр1}} = J_{\text{m1}} \frac{d\omega_{\text{m1}}}{dt} \\ M_{\text{H2}} = M_{\text{y2}} \\ M_{\text{Тр2}} = c_{\text{Тр2}} \omega_{\text{m2}} \\ \frac{dM_{\text{y2}}}{dt} = c_{\varphi 2} (\omega_{\text{m1}} - \omega_{\text{m2}}) \\ M_{\text{y2}} - M_{\text{Тр2}} = J_{\text{m2}} \frac{d\omega_{\text{m2}}}{dt} \end{array} \right.$$

Для получения операторно-структурной формы преобразуем уравнения в операторную форму и разрешим их относительно старшей производной:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{\text{я}}(s) \cdot s = \frac{1}{L_{\text{я}}} \cdot [u_{\text{я}}(s) - R_{\text{я}} \cdot i_{\text{я}}(s) - c_e \cdot \omega(s)] \\ \omega(s) \cdot s = \frac{1}{J_d} \cdot [c_m \cdot i_{\text{я}}(s) - M_{\text{H}}(s)] \\ M_{\text{H1}}(s) = M_{\text{y1}}(s) \\ M_{\text{Тр1}}(s) = c_{\text{Тр1}} \cdot \omega_{\text{m1}}(s) \\ M_{\text{y1}}(s) \cdot s = c_{\varphi 1} [\omega(s) - \omega_{\text{m1}}(s)] \\ \omega_{\text{m1}}(s) \cdot s = \frac{1}{J_{\text{m1}}} [M_{\text{y1}}(s) - M_{\text{y2}}(s) - M_{\text{Тр1}}(s)] \\ M_{\text{H2}}(s) = M_{\text{y2}}(s) \\ M_{\text{Тр2}}(s) = c_{\text{Тр2}} \cdot \omega_{\text{m2}}(s) \\ M_{\text{y2}}(s) \cdot s = c_{\varphi 2} [\omega_{\text{m1}}(s) - \omega_{\text{m2}}(s)] \\ \omega_{\text{m2}}(s) \cdot s = \frac{1}{J_{\text{m2}}} [M_{\text{y2}}(s) - M_{\text{Тр2}}(s)] \end{array} \right.$$

Для полученных уравнений составляем операторно-структурные схемы по уравнениям. Для примера покажем получение ОСС из первого уравнения системы (рисунок 12).

$$i_{я}(s) \cdot s = \frac{1}{L_{я}} \cdot [u_{я}(s) - R_{я} \cdot i_{я}(s) - c_e \cdot \omega(s)]$$

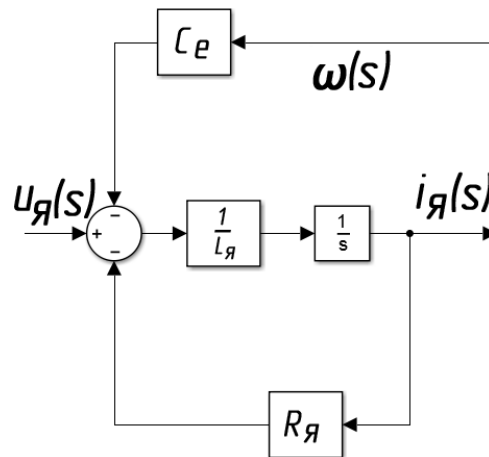


Рисунок 12 – ОСС по первому уравнению системы

После объединения построенных операторно-структурных схем получим общую ОСС, изображенную на рисунке 13.

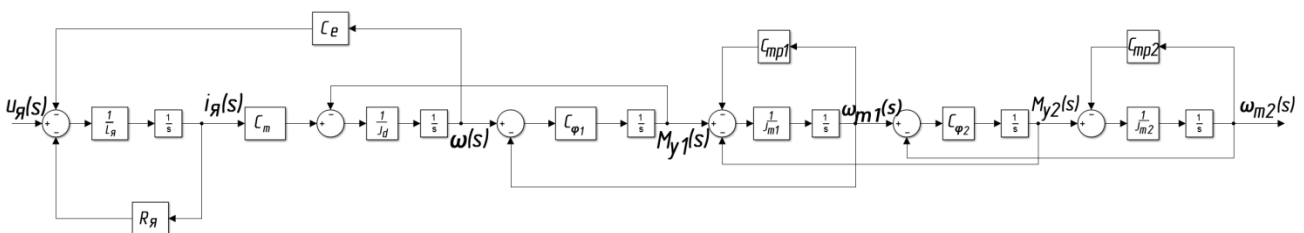


Рисунок 13 – ОСС МехОУ

2.7.2 Моделирование МехОУ

В данном разделе произведем моделирование в пакете прикладных программ MATLAB&Simulink полученной операторно-структурной схемы механического объекта управления. Для этого приведем параметры МехОУ:

$r = 48 \text{ мм} = 0.048 \text{ м}$ – радиус дисков

$m = 600 \text{ гр} = 0,6\text{кг}$ – масса дисков

$J_{mi} = \frac{m \cdot r^2}{2} = \frac{0.6 \cdot (0.048)^2}{2} = 0.0006912 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент инерции i-ого диска

$G = 78.5 \text{ ГПа}$ – Модуль сдвига (справочная величина)

$d_D = 1,8 \text{ мм} = 0.0018 \text{ м}$ – диаметр проволоки, из которой сделана пружина

$d_F = 28 \text{ мм} = 0.028 \text{ м}$ – наружный диаметр пружины

$n = 8$ витков пружины

$$c_i = \frac{G \cdot d_D^4}{8 \cdot d_F^3 \cdot n} = \frac{78.5 \cdot 10^9 \cdot (0.0018)^4}{8 \cdot (0.028)^3 \cdot 8} = 16.42 \text{ Н/м} - \text{жёсткость пружин}$$

$$c_{\phi i} = J_{mi} \cdot c_i = 0.0006912 \cdot 16,42 = 0,01135 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}} - \text{жёсткость соединения}$$

$$c_{\text{тр}1} = c_{\text{тр}2} = 0,2 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}} - \text{коэффициент вязкого трения (справочная величина)}$$

Параметры двигателя приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные двигателя

Обозначение	$R_{я}$	$L_{я}$	c_m	c_e	J_d
Размерность	Ом	Гн	$\frac{\text{Нм}}{a}$	$\frac{\text{вс}}{\text{рад}}$	кг м^2
Значение	100	1,6	0.24	0,24	0,002

Далее собираем схему в Simulink в соответствии с блок-схемой, изображенной на рисунке 1. Полученная схема представлена на рисунке 14.

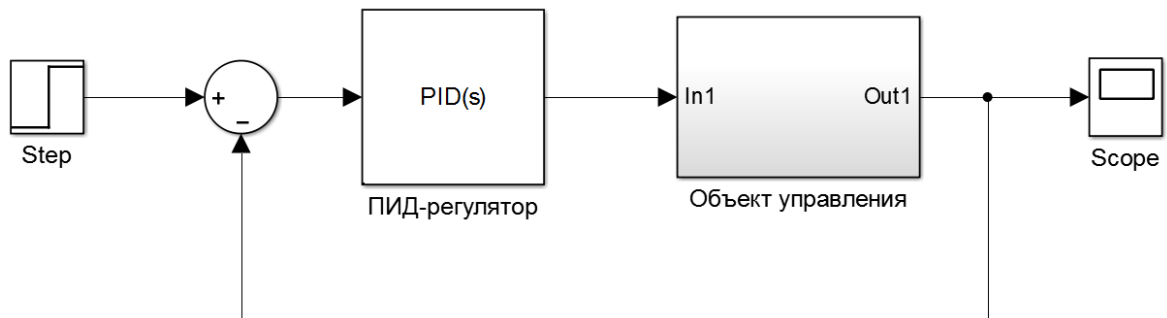


Рисунок 14 – Схема МехОУ в Simulink

В блок “объект управления” поместим, полученную на рисунке 13 схему с заданными параметрами МехОУ (рисунок 15)

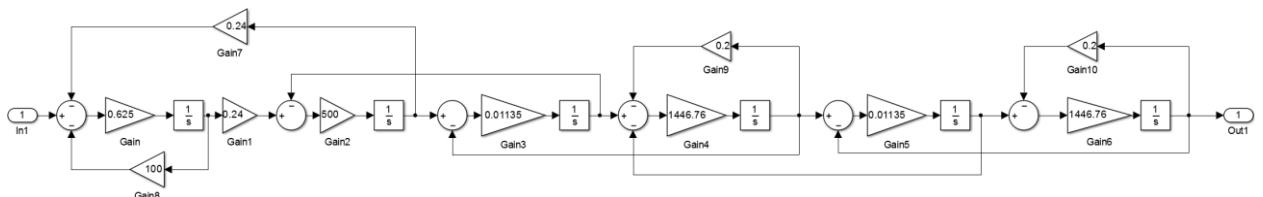


Рисунок 15 – Блок “объект управления” в Simulink

Выполнив настройку ПИД-регулятора, удалось получить следующие переходные процессы: ПП без перерегулирования (рисунок 16а) при $K_P=166,6$, $K_I=19,5$, $K_D=0$; ПП с перерегулированием 13,5% (рисунок 16б) при $K_P=150$, $K_I=50$, $K_D=10$.

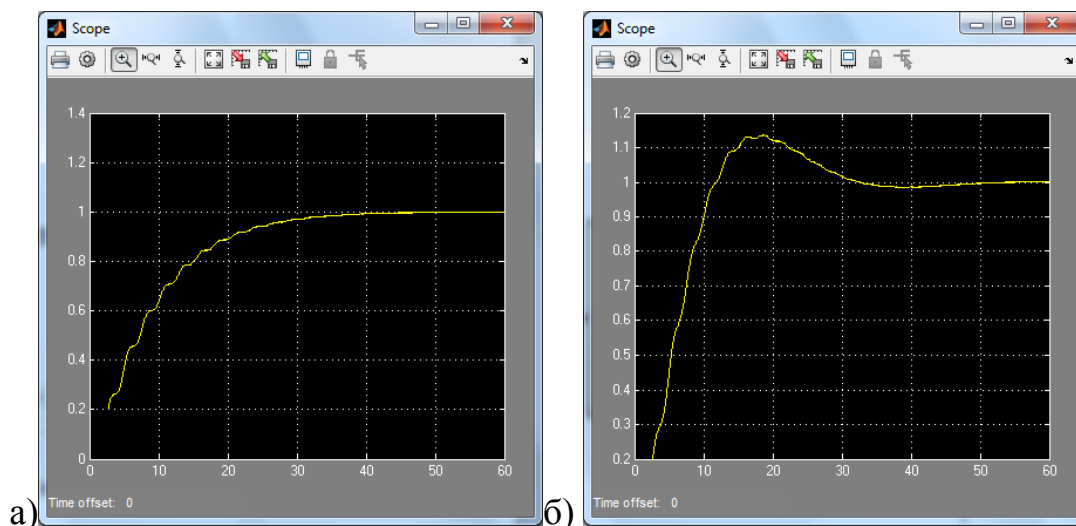


Рисунок 16 – Переходные процессы

Также есть возможность вывести из устойчивого состояния данный объект управления. К особенности трехмассовой системы стоит отнести, что из-за присутствия в системе инерционностей, связанных пружинами, время регулирования составляет достаточно большие значения, по сравнению с электрическим ОУ, и настройка ПИД-регулятора несет существенно более проблематичный характер.

В результате моделирования получили, что механический объект управления подходит для использования его как объекта управления в разрабатываемом стенде. Использование МехОУ позволяет освоить навыки настройки ПИД-регулятора в условиях работы с реальной механической системой, что вызывает большое количество трудностей.

2.8 Дискретный ПИД-регулятор

В промышленности, как правило, ПИД-регуляторы реализованы на микропроцессорных устройствах, и поэтому на обучающем стенде должен также присутствовать и дискретный ПИД-регулятор. В рамках дипломной работы, рассмотрим процесс разработки библиотеки дискретного ПИД-регулятора для микроконтроллера.

2.8.1 Актуальность разработки библиотеки

Несмотря на то, что ПИД-регуляторы достаточно распространены, при тщательном поиске существующих решений удалось выявить лишь две открытые библиотеки, предоставляющие реализацию ПИД-регулятора для микроконтроллеров: «AVR221: Discrete PID controller» и «PIDLibrary».

Библиотека «AVR221: Discrete PID controller» - простой дискретный алгоритм ПИД-регулятора, официально предоставляемый фирмой Atmel. Поддерживается всеми микроконтроллерами AVR. Библиотека реализована в функциональном стиле и предоставляет сильно упрощенную реализацию алгоритма, что указано в самом описании к библиотеке [7]. Там же описаны даже конкретные ограничения ее использования: пользователю советуется обратить особое внимание на точность интегральной и дифференциальной составляющих алгоритма, даны дополнительные рекомендации. Кроме того, использование библиотеки неопытными пользователями затруднено в связи с тем, что пример подключения библиотеки представлен для конкретной среды разработки IAR, где используются встроенные общие функции для работы с прерываниями и встроенные библиотеки IAR, не выложенные в открытый доступ.

Библиотека «PID_v1» - официальная библиотека ПИД-регулятора для популярной платформы Arduino [8]. Написана в объектно-ориентированном стиле и является наиболее продвинутой: в ней учтен опыт разработки цифровых ПИД-регуляторов для промышленности [9], и она предоставляет публичные методы изменения параметров ПИД-регулятора «на лету»:

параметры регулятора, интервал выходной величины, частота вычисления закона управления и другие. Тем не менее, эта библиотека зависит от встроенных функций платформы Arduino, которая не является инструментом для профессиональных разработчиков [10], поэтому ее использование очень ограничено.

Таким образом, существующие открытые библиотеки реализации ПИД-регулятора для микроконтроллеров имеют существенные недостатки, в связи с чем цель, поставленная в рамках дипломной работы, является актуальной.

2.8.2 Непосредственная реализация алгоритма ПИД-регулирования

Для наглядности сначала приведем код программы, который следует из непосредственной реализации алгоритма ПИД-регулятора. Такой алгоритм может быть получен путем простой замены операторов дифференцирования и интегрирования в классическом уравнении ПИД-регулятора (уравнение (6)) конечными разностями и конечными суммами:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (6)$$

$$u_{i+1} = K_p e_i + K_i \sum_{k=0}^i e_k \Delta t + K_d \frac{e_{i+1} - e_i}{\Delta t}, \quad (7)$$

Пример программы, реализующий алгоритм (7) представлен в листинге 1. В нем функция `Compute` может вызываться либо в главном цикле программы, либо через определенные промежутки времени, и, в целом, данная программа является работоспособной.

Листинг 1. Пример программы ПИД-регулятора без учета особенностей дискретной реализации [9].

```
1. /*working variables*/
2. unsigned long lastTime;
3. double Input, Output, Setpoint;
4. double errSum, lastErr;
5. double kp, ki, kd;
6. void Compute()
7. {
8.     /*How long since we last calculated*/
9.     unsigned long now = millis();
10.    double timeChange = (double)(now - lastTime);
```

```

11.
12.  /*Compute all the working error variables*/
13.  double error = Setpoint - Input;
14.  errSum += (error * timeChange);
15.  double dErr = (error - lastErr) / timeChange;
16.
17.  /*Compute PID Output*/
18.  Output = kp * error + ki * errSum + kd * dErr;
19.
20.  /*Remember some variables for next time*/
21.  lastErr = error;
22.  lastTime = now;
23. }
24.
25. void SetTunings(double Kp, double Ki, double Kd)
26. {
27.     kp = Kp;
28.     ki = Ki;
29.     kd = Kd;
30. }

```

Тем не менее, для производственного применения такой алгоритм не подходит, поскольку обладает плохой устойчивостью и низкой точностью [11]. В следующем разделе будут описаны подходы к реализации более качественного решения.

2.8.3 Подходы к разработке качественного алгоритма ПИД-регулятора

2.8.3.1 Частота вычисления закона управления

В непосредственном алгоритме не уделено должное внимание вопросу о том, как часто вычисляется закон управления, т.е. о частоте вызова функции `Compute` из основной программы. Более того, частота вызова этой функции не принимается постоянной, поскольку каждый раз вычисляется приращение времени с предыдущего вызова (переменная `timeChange`). В результате отсутствует постоянное поведение ПИД-регулятора и необходимо выполнять дополнительные действия для вычисления дифференциальной и интегральной составляющих, поскольку они зависят от приращения по времени [9]. Очевидно, что необходимо производить вычисления через постоянный промежуток времени, чтобы упростить вычисления и реализовать более предсказуемый алгоритм. Наиболее эффективным средством для этого является использование прерываний таймеров. При этом образуется сложность, связанная с аппаратной зависимостью установки таймеров и их прерываний. Следовательно, код программы,

инициализирующий эти инструменты, должен содержаться не в библиотеке, а в основной программе, иначе библиотека будет зависеть от платформы. В то же время ПИД-регулятору (библиотеке) необходимо знать период вычисления функции регулирования, который зависит от характеристик объекта управления (ОУ) и будет задаваться в заголовочном файле библиотеки.

2.8.3.2 Учет нелинейности типа «ограничение»

Нелинейность типа «ограничение» связана с естественными ограничениями на конечный диапазон изменения физических величин. В непосредственной реализации цифрового ПИД-регулятора (Листинг 1) оно не принимается во внимание, что является достаточно частой ошибкой при проектировании цифрового ПИД-регулятора и приводит к серьезным проблемам при регулировании [12]. В таком случае рано или поздно возникает ситуация, когда регулятор считает, что посылает сигналы большего значения, чем доходят до ОУ в реальности. Например, если выходная величина реально принимает значения от 0 до 255 (8-канальный ШИМ), а в алгоритме это никак не учтено, то ПИД-регулятор будет выдавать на выходе с каждым моментом все большие значения, стремясь увеличить выходную величину. В результате, при уменьшении задающего значения переходный процесс затягивается [11]. Как правило, под проявлением режима «ограничение» понимают так называемое «интегральное насыщение», поскольку не учет насыщения именно интегральной составляющей приводит к наиболее заметным последствиям для переходного процесса. Тем не менее, рассматриваемую нелинейность необходимо учитывать не только для интегральной составляющей, но и для всего выходного сигнала ПИД-регулятора, что должно быть реализовано в разработанной библиотеке. Для удобства будет выделена публичная функция `pid_SetOutputLimits`, которая позволит пользователю библиотеки установить диапазон выходных значений ПИД-регулятора для корректной работы алгоритма.

2.8.3.3 Выбросы от дифференциальной составляющей

Это нежелательное явление характерно как для аналоговой реализации ПИД-регулятора, так и для дискретной. Любое изменение задающего значения вызывает моментальное изменение ошибки, в результате чего при непосредственной реализации вычисления дифференциальной составляющей (Листинг 1: строка 15) значение производной в этот момент принимает высокое значение, а на графике переходного процесса появляются нежелательные всплески по амплитуде [13]. В качестве решения, задающее значение предполагается постоянным, тогда выражение для вычисления производной ошибки приобретает вид:

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{dy_0(t)}{dt} - \frac{dy(t)}{dt} = |y_0(t) \equiv const| = -\frac{dy(t)}{dt},$$

или в дискретной форме:

$$\frac{e_{i+1} - e_i}{\Delta t} = -\frac{(y_{i+1} - y_i)}{\Delta t}, \quad (8)$$

Таким образом, в алгоритме ПИД-регулятора вычисление дифференциальной составляющей целесообразно проводить с учетом равенства (8). Здесь также следует обратить внимание, что при вычислении используется значение управляемой величины y в предыдущий момент времени. Часто задают фиксированное нулевое начальное значение y , что может привести к появлению нежелательного переходного процесса. Например, в случае, когда управляемая величина до подключения к ПИД-регулятора к ОУ уже находилась на уровне задающего воздействия y_0 . Естественным решением этой потенциальной проблемы является не ручное задание начального значения y , а получение его реальной величины. Это будет учтено в разрабатываемой библиотеке.

2.8.3.4 Выбросы от интегральной составляющей

При реализации дискретного ПИД-регулятора известной проблемой также является появление нежелательных выбросов регулируемой величины

при скачкообразном изменении коэффициентов ПИД-регулятора. Наиболее чувствительной в этом плане является интегральная составляющая [14]. При изменяющемся параметре $K_I = K_I(t)$ интегральный член можно записать в двух формах: $I(t) = K_I \int e(t) dt$ или $I(t) = \int K_I e(t) dt$.

В первом случае при скачкообразном изменении $K_I(t)$ интегральный член будет меняться скачком, во втором случае – плавно, поскольку $K_I(t)$ находится под знаком интеграла, значение которого не может изменяться скачком [11]. В разностном представлении внесение интегрального коэффициента под интеграл соответствует следующему выражению для вычисления интегральной составляющей:

$$I_{i+1} = I_i + K_I \Delta t \cdot e_{i+1} \quad (9)$$

В разрабатываемом алгоритме, вместо хранения суммы для ошибки и умножению ее на интегральный коэффициент (Листинг 1: строки 14, 18) мы будем согласно (9) хранить значение для интегральной составляющей, увеличивая его при каждом вычислении на произведение интегрального коэффициента и ошибки. Таким образом, при использовании в библиотеке публичной функции, позволяющей изменять параметры ПИД-регулятора на лету, будет решена вышеуказанная проблема.

2.8.4 Описание разработанной библиотеки

Согласно выражениям (8) и (9) можем записать уравнение ПИД-регулятора с учетом особенностей дискретной реализации:

$$u_{i+1} = K_p e_i + I_i + K_I \Delta t \cdot e_{i+1} - K_d \frac{(y_{i+1} - y_i)}{\Delta t} \quad (10)$$

Используя уравнение (10) и подходы, описанные в предыдущем разделе, на высокоуровневом языке программирования С была разработана библиотека ПИД-регулятора, состоящая из двух файлов: *pid.h* и *pid.c*.

Файл *pid.h* представляет собой заголовочный файл, содержащий определение статических параметров и объявление публичных функций библиотеки. Содержание этого файла представлено в приложении А. Опишем статические параметры, которые задаются в этом файле пользователем и зависят от конкретной задачи регулирования и используемой аппаратной базы. Определения `DEFAULT_MIN_OUT` и `DEFAULT_MAX_OUT` задают допустимый диапазон выходных значений ПИД-регулятора для предотвращения насыщения и по умолчанию соответствуют диапазону 8-канального ШИМ. Определение `SAMPLE_TIME` равно периоду вызова функции ПИД-регулятора из основной программы и соответствует Δt из (10) – это значение используется библиотекой при вычислении интегральной и дифференциальной составляющих. Далее объявляется начальное условие для значения интегральной составляющей `INITIAL_INTEGRAL_TERM`, которое по умолчанию равно 0, но в некоторых задачах может потребоваться ее изменение [11].

Файл *pid.c* представляет собой основной файл с реализацией библиотеки. Содержание этого файла представлено в приложении Б. В начале файла определяется пользовательский тип данных - структура `PID_DATA`, экземпляр которой (`pidData`) будет использоваться библиотекой для хранения данных ПИД-регулятора между вызовами функций. Затем определяется функция инициализации `pid_Init`, которая в качестве аргументов принимает коэффициенты ПИД-регулятора, начальное значение управляемой величины и заполняет `pidData` начальными значениями. Часть инициализации происходит с помощью функций, которые выделены для публичного доступа - `pid_setParams` и `pid_setOutputLimits`. Функция `pid_setParams` записывает переданные значения коэффициентов ПИД-регулятора в `pidData` с учетом периода дискретизации Δt . Функция `pid_setOutputLimits` записывает в `pidData` наибольшее и наименьшее допустимое выходное значение ПИД-регулятора. Основная функция ПИД-регулятора `pid_Controller` представляет собой реализацию уравнения (10): она

принимает значения задающего воздействия `setPoint` и управляемой величины `processValue` и, используя `pidData`, возвращает значение управляющего воздействия. Эта функция должна вызываться регулярно через промежуток времени, определяемый `SAMPLE_TIME` в файле `pid.h`. Помимо непосредственного вычисления по формуле (10), в этой функции также происходит проверка на насыщение ПИД-регулятора и обновляется вспомогательная структура `pidData`.

2.8.5 Тестирование разработанной библиотеки

2.8.5.1 Общие подходы

При разработке любого программного обеспечения важными этапами является отладка и тестирование программы. При разработке ПО для микроконтроллеров эти этапы имеют свою специфику, поскольку соответствующие инструменты для микроконтроллеров не особо распространены и их трудно найти в открытом доступе. Это связано со сложностью разработки подобных инструментов, многообразием микроконтроллеров, а также частой ненадобностью таких инструментов - в большинстве практических случаев можно просто прошивать реальное устройство. Тем не менее, при использовании различных периферийных устройств и сложных внешних электронных схем такой подход отнимает много времени, особенно если его необходимо повторять много раз и вносить изменения в схему. В этом случае эффективным средством отладки программ на МК является моделирование в среде `ISIS Proteus`, позволяющей собрать схему с микроконтроллером и виртуально прошить его. Тем не менее, в этой среде нет возможности проводить полноценную отладку программы. Кроме того, моделирование не всегда адекватно и, конечно, не освобождает разработчика от тестирования программы на реальном устройстве, но тем не менее, оно способствует устранению наиболее значимых ошибок в коде программы до натурального тестирования и в

большинстве случаев позволяет получить минимально работоспособную версию программы.

Фрагмент рабочей среды при отладке разработанной библиотеки представлен на Рис17. Для подключения ОУ к МК без линий связи используются терминалы с уникальными идентификаторами: SETPOINT – задающее воздействие, CO OUT – выход ОУ, CO IN – вход ОУ. Для вывода графиков на аналоговый анализатор используются одноименные элементы Voltage Probe.

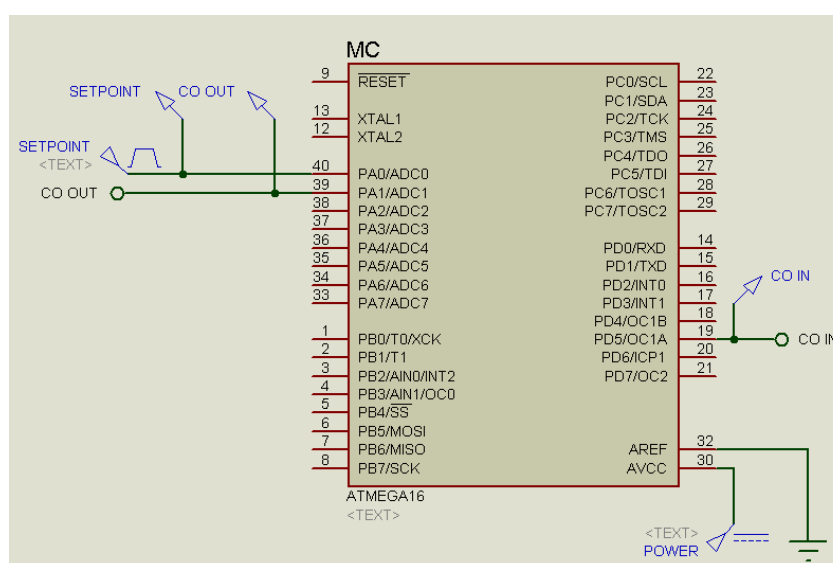


Рисунок 17 – Микроконтроллер с терминалами подключения к ОУ в среде Proteus

2.8.5.2 Тестирование с объектом управления первого порядка

Для тестирования библиотеки ПИД-регулятора в качестве ОУ с менее колебательным переходным процессом был выбран интегратор в простейшей реализации (Рисунок 18) с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{1}{RC \cdot s + 1} \quad (11)$$

и номиналами компонентов $R = 200$ кОм, $C = 470$ нФ, обеспечивающими более продолжительное время ПП $t_{пп} \approx 400$ мс (Рисунок 19).

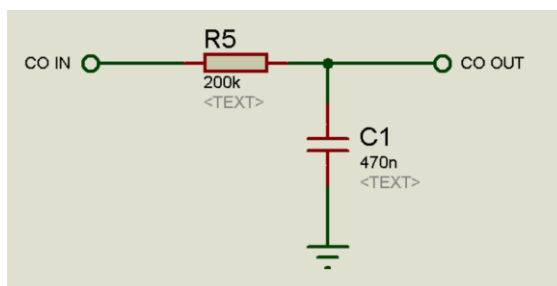


Рисунок 18 – ОУ 1-го порядка.

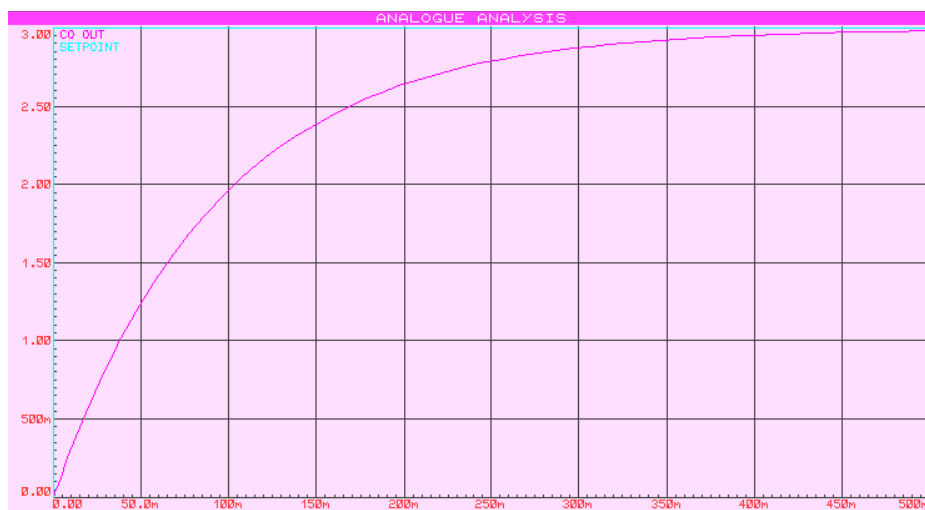


Рисунок 19 – Переходный процесс ОУ 1-го порядка.

ОУ 1-го порядка включается в собранную схему согласно рисунку 1. В качестве управляющей величины для всех последующих диаграмм напряжения используется ступенчатое воздействие с уровнем 3 В. Форма сигнала на выходе ОУ при коэффициентах ПИД-регулятора $K_P=1$, $K_I=K_D=0$ представлена на рисунке 20. Видно, что система выходит на установившийся режим. При этом по сравнению с жестким управлением (рисунок 19) время переходного процесса уменьшилось примерно в 4 раза, но появилась статическая ошибка – характерная для П-регулирования. Делаем вывод, что регулятор обрабатывает корректно, и далее проверяем его работу при изменении интегральной и дифференциальной составляющих.

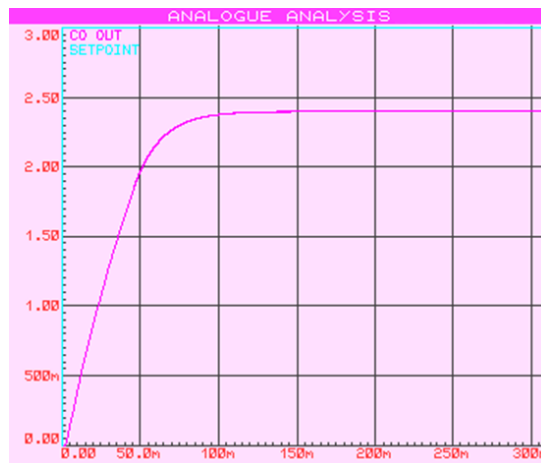


Рисунок 20 – Форма сигнала на выходе ОУ ($K_P=1$, $K_I=K_D=0$).

Для устранения статической ошибки при регулировании увеличивают интегральную составляющую. На рисунке 21а представлена форма сигнала с увеличенным интегральным коэффициентом $K_I=7$. Как видно, произошло ожидаемое устранение статической ошибки. Дальнейшее увеличение интегральной составляющей, как и следует, приводит к появлению перерегулирования (**Ошибка! Источник ссылки не найден.б**).

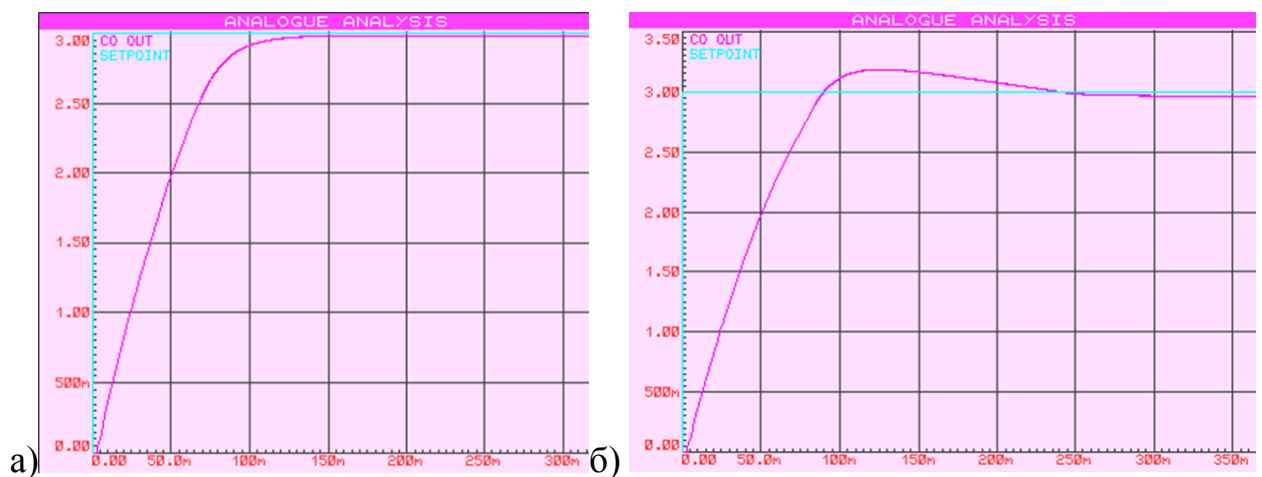


Рисунок 21 – Форма сигнала на выходе ОУ ($K_P=1$, $K_I=7$ (а), $K_I=10$ (б), $K_D=0$).

Увеличим пропорциональную и дифференциальную составляющие для устранения перерегулирования (Рисунок 22122).

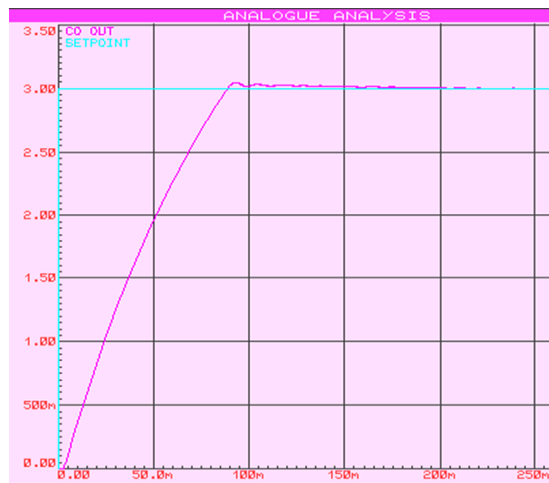


Рисунок 221 – Форма сигнала на выходе ОУ ($K_P=10$, $K_I=10$, $K_D=0.01$)

Таким образом, использование в качестве ОУ менее сложной и менее быстродействующей системы позволило убедиться в том, что разработанная программа работает корректно.

2.8.5.3 Демонстрация целесообразности использованных подходов

При разработке библиотеки были использованы проверенные теоретические сведения и подходы, которые позволили избежать часто встречающихся ошибок при создании дискретного ПИД-регулятора. В данном разделе будет произведено показательное сравнение форм сигнала на выходе замкнутой системы с ПИД-регулятора при изменениях исходного кода разработанной библиотеки в сторону алгоритма прямой реализации (7).

2.8.5.3.1 Нелинейность типа «ограничение»

Уберем из кода библиотеки проверку на диапазон допустимых значений на выходе ПИД-регулятора. Вид функции `pid_Controller` после этих изменений представлен в Листинге 2.

Листинг 2. Основная функция ПИД-регулятора без проверки на ограничение выходного сигнала

```

1. double pid_Controller(int16_t setPoint, int16_t processValue)
2. {
3.     double error, p_term, d_term;
4.     double out;
5.
6.     error = setPoint - processValue;
7.

```

```

8.  pidData.integralTerm += pidData.ki * error;
9.  d_term = pidData.kd * (processValue - pidData.lastProcessValue);
10. p_term = pidData.kp * error;
11. out = (p_term + pidData.integralTerm - d_term);
12. pidData.lastProcessValue = processValue;
13. return out;
14. }

```

Формы сигнала на выходе ОУ с различными реализациями функции `pid_Controller` при П-регулировании ($K_P=1$) представлены на рисунке 23. Сравнивая формы сигнала, полученные до и после включения в алгоритм проверки на ограничение, целесообразность использования этой проверки особенно показательна: форму сигнала, полученную без нее (рисунок 23а) сложно назвать корректной.

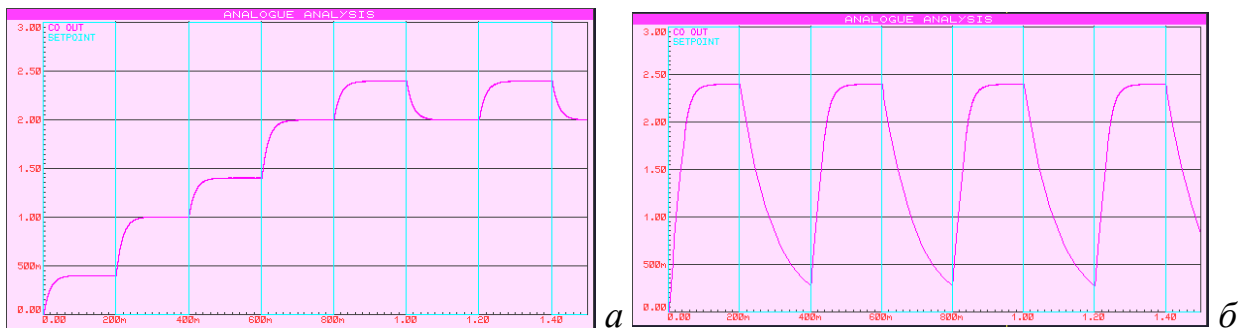


Рисунок 23 – Форма сигнала на выходе ОУ ($K_P=1$, $K_I=K_D=0$) без учета в алгоритме нелинейности типа «ограничение» (а) и с учетом (б).

2.8.5.3.2 Выбросы от дифференциальной составляющей

Продemonстрируем целесообразность используемого равенства (8) для вычисления дифференциальной составляющей. На рисунке 24а представлена форма сигнала на выходе ОУ при вычислении дифференциальной составляющей согласно непосредственному алгоритму (7). На рисунке 24б представлена форма сигнала при тех же параметрах регулятора, но при вычислении дифференциальной составляющей согласно равенству (8). Как видно, использованный подход предотвратил выбросы от дифференциальной составляющей и позволил обеспечить корректный переходный процесс.

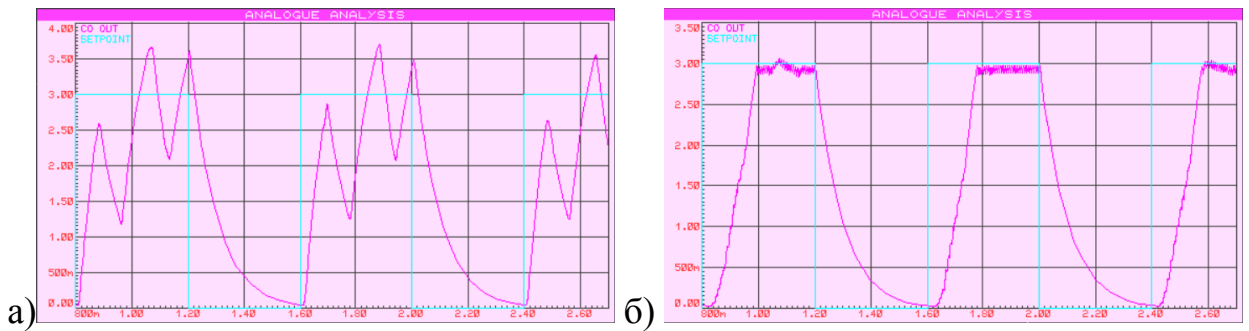


Рисунок 24 – Форма сигнала на выходе ОУ ($K_P=1$, $K_I=25$, $K_D=0.05$) при вычислении дифференциальной составляющей по непосредственному алгоритму (а) и по разработанному (б).

2.8.5.3 Выбросы от интегральной составляющей

Ранее было предложено использование формулы (9) для вычисления интегральной составляющей, заключающейся во внесении интегрального коэффициента K_I внутрь суммы. Этот подход мотивирован выбросами от интегральной составляющей при скачкообразном изменении K_I . Добавим в основную программу двукратное уменьшение коэффициента K_I в момент времени $t=1.97$ и получим формы сигнала при вычислении интегральной составляющей с K_I вынесенным за знак суммы (рисунок 25а) и со внесленным (рисунок 25б).

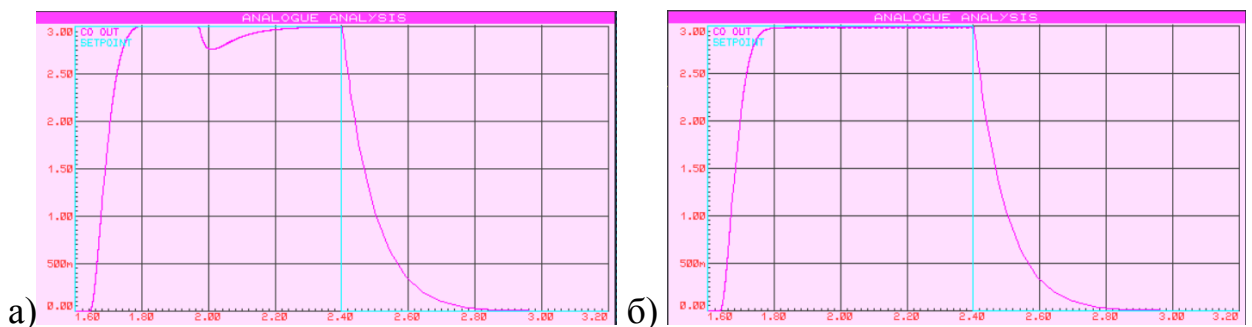


Рисунок 25 – Форма сигнала на выходе ОУ при $K_P=1$, $K_I=25 \rightarrow 12.5$ ($t=1.97$), $K_D=0$ при вычислении интегральной составляющей по непосредственному алгоритму (а) и по разработанному (б).

Как видно из рисунка 25, использование формулы (9) для вычисления интегральной составляющей позволило избежать явления выбросов от интегральной составляющей.

2.9 Результаты и перспективы разработки стенда ПИД-регулятора

В результате проделанной работы были получены 5 основных модулей разрабатываемого стенда:

- Первый модуль – аналоговый электрический объект управления. Данный ОУ представляет собой устойчивое звено третьего порядка. В задаче стояло получение ОУ третьего порядка с желаемой передаточной функцией и разработка электрической схемы, которая бы соответствовала данной ПФ. Поставленная задача была достигнута в полном объеме.
- Второй модуль – аналоговый ПИД-регулятор. Одной из важнейших задач являлась разработка схемы ПИД-регулятора на пассивных элементах и операционных усилителях с возможностью корректировки любой из составляющих (пропорциональной, интегральной и дифференциальной) регулятора “на лету”. Даная задача так же была выполнена в полном объеме.
- Третий модуль – модуль ШИМ-питания. Данный модуль предназначен для питания двигателя механического объекта управления в режиме широтно-импульсной модуляции, что было необходимо из-за невозможности прямого питания ДПТ с ПИД-регулятора. Как результат, разработанная схема в соответствии с полученным от регулятора сигналом изменяет ШИМ-режим питания двигателя, что дает нам возможность регулирования частоты вращения вала.
- Четвёртый модуль – механический объект управления. Данный ОУ является реальной механической трехмассовой системой. Настройка ПИД-регулятора для работы с данным МехОУ способна показать особенности реальных систем и трудности, связанные с работой реальных систем.
- Пятый модуль – дискретный ПИД-регулятор. Поскольку в промышленности, как правило, ПИД-регуляторы реализованы на

микропроцессорных устройствах, возникает необходимость наличия также и дискретного ПИД-регулятора. В данной работе не приведена схемотехника для дискретного ПИД-регулятора. Однако была разработана библиотека цифрового ПИД-регулятора, в которой учтены многие проблемы, возникающие при написании алгоритмов ПИД-регулирования. А также к особенностям данной библиотеки относится отсутствие зависимости от аппаратной части и конкретной среды разработки.

К недостаткам разработанного стенда можно отнести отсутствие сопряжения работы стенда с ПК и отсутствие технической реализации дискретного ПИД-регулятора

К достоинствам стенда относятся наличие аналогового ПИД-регулятора с возможностью натурной настройки любого из звеньев регулятора; наличие двух видов объектов управления. Электрического ОУ с быстротечным ПП и механического ОУ, при работе с которым можно проследить существенную разницу между моделированием и работой с реальной технической системой. Также наличие программно непривязанной библиотеки дискретного ПИД-регулятора позволит в короткие сроки технически реализовать данный тип регулятора.

В перспективе развития данной работы стоит техническая реализация дискретного ПИД-регулятора и сопряжение работы стенда с ПК. На начальном этапе в качестве реализации Windows-приложения для изменения значения коэффициентов дискретного ПИД-регулятора с ПК. Также в будущем планируется сделать возможным отслеживание работы любого из модулей с помощью специального приложения на ПК. В качестве повышения модульности стенда рассматривается вариант увеличения ряда объектов управления.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
8Т31	Селивёрстову Павлу Андреевичу

Институт	ИК	Кафедра	СУМ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<ol style="list-style-type: none"> 1. Показатели оценки качества разработки. 2. Показатели оценки коммерческого потенциала разработки. 3. Сильные и слабые стороны, возможности и угрозы проекта. 	<ul style="list-style-type: none"> – Надежность, низкая цена, безопасность и т.д.; – Конкурентоспособность, срок выхода на рынок, перспективность рынка, послепродажное обслуживание, и т.д.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<ol style="list-style-type: none"> 1. Оценка качества разработки и ее перспективности на рынке с помощью технологии <i>QuaD</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> – Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации; – по результатам оценки качества и перспективности разработка имеет оценку выше среднего ($P_{cp}=68,3$) и выгодной для инвестиций;
<ol style="list-style-type: none"> 2. Исследование внешней и внутренней среды проекта с помощью <i>SWOT</i>-анализа 	<ul style="list-style-type: none"> – <i>SWOT</i>-анализ представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта; – для упрощения процедуры проведения <i>SWOT</i>-анализ проводят в табличной форме.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	12.11.2016г.
--	--------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицын В. В.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т31	Селивёрстов П. А.		

3. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Исследования, проведенные в ходе выполнения ВКР, направлены на оценку потребности в создании стендов ПИД-регулятора, которые необходимы для получения студентами профильных специальностей практических навыков по натурной настройке ПИД-регуляторов.

Данное исследование актуально для различных университетов и техникумов, подготавливающих специалистов в сфере автоматике, так как существует реальная потребность в приобретении практических навыков работы с ПИД-регуляторами, однако материальная база, позволяющая воплотить это, отсутствует. После разработки стенда ПИД-регулятора для модели нефтепромысла, необходимо провести оценку ресурсоэффективности и ресурсосбережения, для этих целей выполним раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

Конечными потребителями являются сотрудники кафедр университетов и техникумов.

3.2 Анализ конкурентных технических решений

В настоящее время стоит проблема обучения персонала в области автоматике, связанная с отсутствием необходимой образовательной базы. В частности есть проблема, связанная с темой приобретения навыков натурной настройки ПИД-регуляторов. Исходя из этого предложено создание обучающего стенда.

Регуляторы используются в системах автоматического управления для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса. Эти параметры определяют то, как быстро система входит в установившийся режим и насколько велики

перерегулирования во время переходного процесса, что в конечном счете определяет качество получаемого продукта и затраты на его производство. Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор относится к наиболее распространенному типу регуляторов. Причиной высокой популярности является простота построения и промышленного использования, ясность функционирования, пригодность для решения большинства практических задач, и низкая стоимость. Вместе с тем, не существует универсального метода настройки ПИД-регуляторов, а моделирование и теория часто не учитывают особенностей, порождаемых реальными условиями применения и технической реализации. В этом контексте, для студентов профильных специальностей является важным изучение ПИД-регуляторов на реальной элементной базе и приобретения опыта их «живой» настройки до столкновения с такими задачами на производстве.

Основная функция разрабатываемого стенда – это отработка навыков натурной настройки ПИД-регулятора, т.е. возможность изменения значений пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-регулятора и одновременного наблюдения изменения переходной характеристики объекта управления (ОУ).

В настоящее время на рынке присутствуют такие конкуренты как компания “Денар” с комплектом типового учебного оборудования "Настройка ПИД-регулятора" НПИД1-С-К и компания “Овен”, которая выступила поставщиком стенда по изучению ПИД законов регулирования для Московского автомобильно-дорожного Государственного технического университета (МАДИ).

К преимуществам конкурентов можно отнести наличие репутации в сфере автоматике на рынке и высокую надежность поставляемого оборудования, что связано с достаточно большим опытом. Также к преимуществам можно отнести то, что поставляемые стенды ориентированы

на удобство пользователя и хорошо сопряжены с ПК. Однако проблема сопряжения с ПК будет проработана в дальнейших модификациях стенда, предложенного в дипломной работе, что позволит исключить этот пункт из списка преимуществ конкурентов.

В то же время существенными недостатками конкурентов являются высокая стоимость поставляемых стендов, низкая ремонтпригодность и трудность в подключении дополнительных модулей для стенда, например, механического объекта управления.

Проведем анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Надежность	0,15	3	4	4	0,45	0,6	0,6
2. Модульность	0,20	5	5	4	1	1	0,8
3. Сопряжение с ПК	0,15	2	4	4	0,3	0,6	0,6
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Перспективность рынка	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
2. Цена	0,4	5	2	3	2	0,8	1,2
Итого	1	Суммарная оценка			4,15	3,4	3,6

Б_ф – разработанный стенд ПИД-регулятора; Б_{к1} – Комплект типового учебного оборудования "Настройка ПИД-регулятора" НПВД1-С-К; Б_{к2} – Учебно-лабораторный стенд по изучению пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) законов регулирования МАДИ.

Анализ конкурентных технических решений рассчитаем по формуле 12:

$$K = \sum V_i \cdot B_i \quad (12)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Преимущество перед конкурентами: Низкая цена, так как все модули стенда выполняются собственными силами на лучших представителях отечественных компонентов.

Продукты конкурентов выигрывают в сопряжении с ПК, но цена тех стендов очень высока. Для устранения данной слабой стороны разработанного стенда в будущем планируется добавить возможность просмотра всех параметров стенда с ПК, а также возможность регулировать параметры дискретного ПИД-регулятора.

3.3 Технология QuaD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект. По своему содержанию данный инструмент близок к методике оценки конкурентных технических решений. Технология может использоваться при проведении различных маркетинговых исследований, существенным образом снижая их трудоемкость и повышая точность и достоверность результатов. Оценочная карта представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	
Показатели оценки качества разработки					
Надежность	0,10	50	100	0,50	0,05
Модульность	0,18	60	100	0,60	0,108

Продолжение таблицы 5

Сопряжение с ПК	0,10	20	100	0,20	0,02
Срок эксплуатации	0,05	50	100	0,50	0,025
Ремонтопригодность	0,05	100	100	1	0,05
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
Перспективность рынка	0,07	100	100	1	0,07
Цена	0,45	80	100	0,80	0,36
Итого	1			6,95	0,683

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$P_{ср} = \sum P_i \cdot 100$, где $P_{ср}$ – средневзвешенное значение показателей качества и перспективности научной разработки; P_i – средневзвешенное значение показателя. Значение $P_{ср}$ позволяет говорить о перспективах разработки и качестве проведенного исследования. Если значение показателя $P_{ср}$ получилось от 100 до 80, то такая разработка считается перспективной. Если от 79 до 60 – то перспективность выше среднего. Если от 69 до 40 – то перспективность средняя. Если от 39 до 20 – то перспективность ниже среднего. Если 19 и ниже – то перспективность крайне низкая.

$$P_{ср} = \sum P_i \cdot 100 = 0,683 \cdot 100 = 68,3$$

Вывод:

По результатам оценки качества и перспективности разработка имеет оценку выше среднего, что свидетельствует нам о не завышенных показателях. ($P_{ср} = 68,3$).

3.4 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Он проводится в несколько этапов.

Составляем результирующую матрицу SWOT (таблица 6).

Таблица 6 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны: С1. Невысокая стоимость изделия в связи с использованием простейших радиоэлектронных компонентов; С2. Возможность подключения любого внешнего ОУ; С3. Легкое подключение осциллографа к любым точкам стенда; С4. Наличие двух видов ПИД-регуляторов.</p>	<p>Слабые стороны: Сл1. Низкая надежность в связи с ручным изготовлением всех элементов стенда; Сл2. Невысокое качество стенда, т.к. отсутствует опыт в реализации подобных проектов; Сл3. Ручное изготовление ПИД-регуляторов; Сл4. Отсутствие репутации на рынке.</p>
<p>Возможности: В1. Повышение спроса на стенды; В2. Внедрение опытных образцов на кафедры университетов и техникумов; В3. Повышение качества образования; В4. Повышение заинтересованности студентами.</p>	<p>В1В4С1С2С3С4 – При повышении спроса на обучающие стенды данный стенд при всех его сильных сторонах становится выгодным предложением и потенциально будет обладать высоким спросом</p>	<p>В1Сл1Сл4 – Отсутствие репутации на рынке негативно сказывается на перспективности данного стенда, так как даже при появлении спроса на такого типа стенды, не каждая кафедра может быть уверена в надежности стенда</p>
<p>Угрозы: У1. Низкая скорость изготовления стендов; У2. Повышение стоимости комплектующих; У3. Отсутствие инициативы внедрения новых технологий в образовательный процесс; У4. Появление на рынке стендов более известных производителей.</p>	<p>У4С1С2С3С4 – Появление на рынке конкурента, который долгое время работает в сфере автоматике, может негативно сказаться на перспективности всего проекта, так как потребитель может сделать выбор в пользу известного бренда даже при высокой стоимости стендов.</p>	

4. Планирование научно-исследовательских работ

4.1 Структура работ в рамках научного исследования

Группа участников состоит из студента и руководителя. Для выполнения научного исследования сформирован ряд работ, назначены должности исполнителя для каждого этапа работы (таблица 7).

Таблица 7 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Исполнитель
Разработка технического задания	1.	Выбор направления научного исследования	Студент
	2.	Составление и утверждение технического задания	Руководитель, Студент
Анализ предметной области	3.	Обзор литературы	Студент
	4.	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	5.	Анализ отобранного материала	Студент, Руководитель
Разработка ПИД-регулятора и аналогового электрического ОУ	6.	Синтез ПФ ОУ	Студент
	7.	Синтез схемы ОУ	Студент
	8.	Синтез схемы ПИД-регулятора	Студент
	9.	Тестирование и доработка системы	Студент
Разработка механического ОУ и модуля ШИМ-питания	10.	Разработка печатных плат модулей	Студент
	11.	Разработка схемы механического объекта управления	Студент
	12.	Составление чертежей составных частей	Студент
	13.	Сборка механического объекта управления	Студент
	14.	Разработка модуля ШИМ-питания для механического ОУ	Студент
15.	Тестирование и доработка механического ОУ	Студент	
Работа со стендом	16.	Общая сборка стенда	Студент
	17.	Тестирование и доработка всего стенда	Студент
	18.	Проверка работы с руководителем	Студент, Руководитель

Продолжение таблицы 7

Оформление отчета	19.	Написание раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Студент
	20.	Написание раздела «социальной ответственности»	Студент
	21.	Написание основного раздела дипломной работы	Студент
	22.	Проверка работы с руководителем	Студент, Руководитель
	23.	Подготовка презентации дипломного проекта	Студент

4.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Для определения трудоемкости работ будем использовать такие показатели как ожидаемое значение трудоемкости, продолжительность каждой работы, продолжительность выполнения i – ой работы в календарных днях и коэффициент календарности.

Для расчета ожидаемого значения продолжительности работ $t_{ож}$ применяется следующая формула 13:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5} \quad (13)$$

где t_{min} – минимальная трудоемкость i -ой работы, чел/дн.;

t_{max} – максимальная трудоемкость i -ой работы, чел/дн.

Из расчета ожидаемой трудоемкости работ, определим продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями (формула 14).

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} \quad (14)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для построения диаграммы Ганта, переведем длительность каждого из этапов работ в календарные дни (формула 15).

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} \quad (15)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле 16:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad (16)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Коэффициент календарности: $K_{\text{кал}} = 365 / (365 - 119) = 1,48$.

Расчеты по трудоемкости выполнения работ приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Временные показатели проведения научного исследования

Название Работы	Трудоёмкость работ						Исполнители		Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{\text{ожг}}$, чел-дни					
	Студент	Преподаватель	Студент	Преподаватель	Студент	Преподаватель	Студент	Преподаватель	Одновременное выполнение работ	Одновременное выполнение работ
Выбор направления научного исследования	14	1	28	2	19,6	1,4			10,5	15,54
Составление и утверждение технического задания	14	1	28	2	19,6	1,4			10,5	15,54

Продолжение таблицы 8

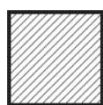
Обзор литературы	14	0	28	0	19,6	0			9,8	14,504
Подбор и изучение материалов по теме	14	0	28	0	19,6	0			9,8	14,504
Анализ отобранного материала	7	3	14	6	9,8	4,2			7	10,36
Синтез ПФ ОУ	14	2	20	4	16,4	2,8			9,6	14,208
Синтез схемы ОУ	10	1	14	2	11,6	1,4			6,5	9,62
Синтез схемы ПИД-регулятора	8	1	14	2	10,4	1,4			5,9	8,732
Тестирование и доработка системы	5	1	10	3	7	1,8			4,4	6,512
Разработка печатных плат модулей	28	1	36	2	31,2	1,4			16,3	24,124
Разработка схемы механического объекта управления	8	1	14	2	10,4	1,4			5,9	8,732
Составление чертежей составных частей	14	0	20	0	16,4	0			8,2	12,136
Сборка механического объекта управления	28	1	36	2	31,2	1,4			16,3	24,124
Разработка модуля ШИМ-питания для механического ОУ	8	1	14	2	10,4	1,4			5,9	8,732
Тестирование и доработка механического ОУ	14	1	18	2	15,6	1,4			8,5	12,58

Продолжение таблицы 8

Общая сборка стенда	8	0	16	0	11,2	0			5,6	8,288
Проверка работы с руководителем	3	3	7	7	4,6	4,6			4,6	6,808
Написание раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	10	0	14	0	11,6	0			5,8	8,584
Написание раздела «социальной ответственности»	10	0	14	0	11,6	0			5,8	8,584
Написание основного раздела дипломной работы	28	0	36	0	31,2	0			15,6	23,088
Проверка работы с руководителем	2	2	4	4	2,8	2,8			2,8	4,144
Подготовка презентации дипломного проекта	3	1	5	2	3,8	1,4			2,6	3,848
Итого	264	21	418	44	326	30,2			177,9	263,292

4.3 Разработка графика проведения научного исследования

По данным из таблицы 8 «Временные показатели проведения научного исследования» создадим диаграмму Ганта, которая строилась при максимальном количестве дней каждой работы. Данная диаграмма представлена на рисунке 26.



– работа, которую выполняет студент,



– работа, которую выполняет преподаватель.

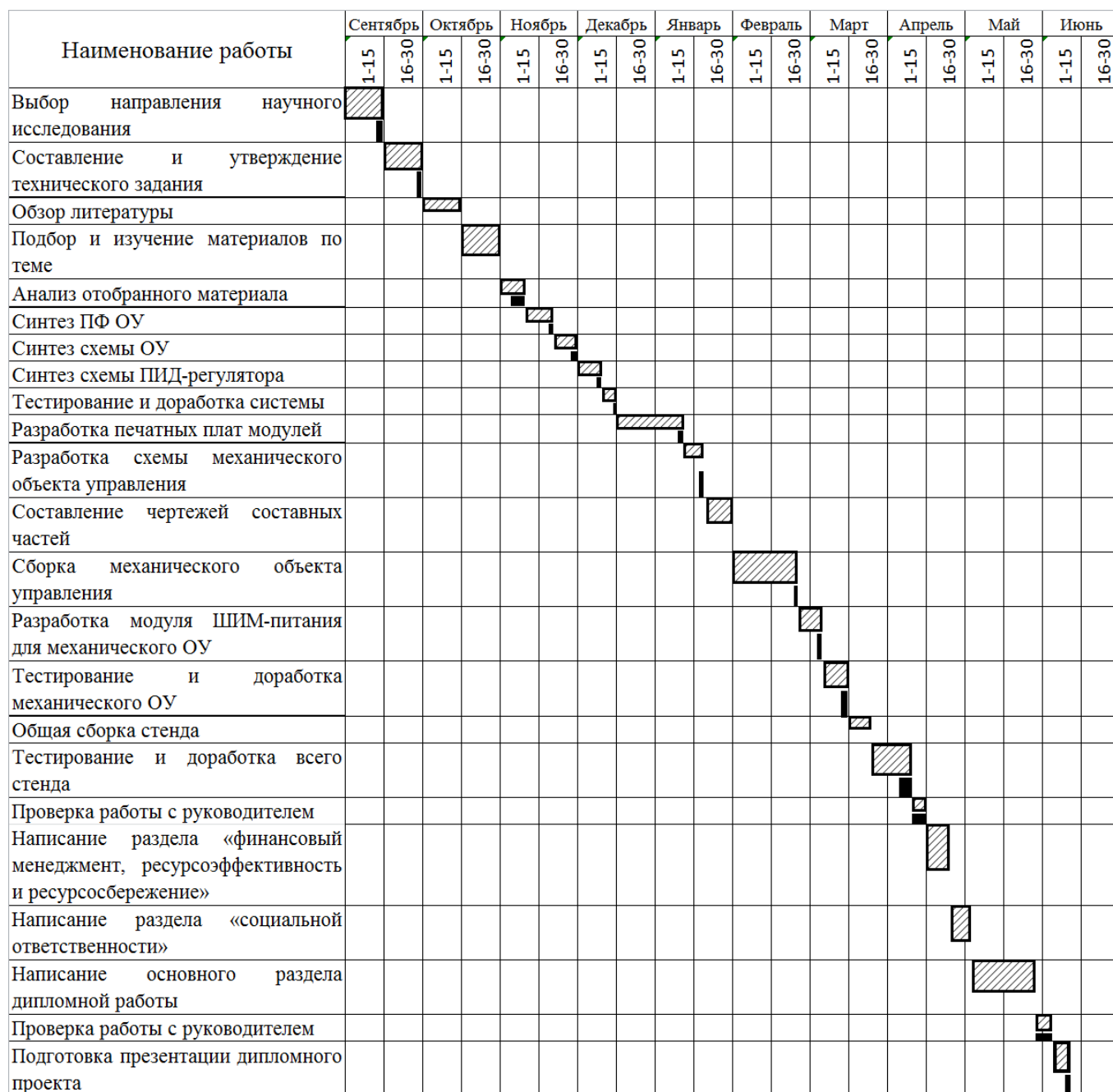


Рисунок 26 – Диаграмма Ганта

4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

Бюджет научно-технического исследования должен быть основан на достоверном отображении всех видов расходов, связанных выполнением

проекта. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных работ;
- заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).

4.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

Для вычисления материальных затрат воспользуемся следующей формулой 17:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi} , \quad (17)$$

где m – количество видов материальных ресурсов;

$N_{расxi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов;

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Для разработки данного научного проекта необходимы следующие материальные ресурсы: ПК, принтер, паяльная станция, осциллограф, радиоэлектронные компоненты (таблица 9).

Таблица 9 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена
			(руб.)
ПК	Шт.	1	30000
Канцелярские товары	Шт.	1	500
Печатаная бумага	Пачка	1	300
Паяльная станция	Шт.	1	12000
Осциллограф	Шт.	1	55000
Операционный усилитель LM324	Шт.	11	220
Резистор постоянный 0.25 Вт	Шт.	13	13
Резистор переменный 0.25 Вт	Шт.	5	250

Продолжение таблицы 9

Конденсаторы керамические 25В	Шт.	8	40
Кнопка тактовая	Шт.	6	30
Микроконтроллер AtMega328	Шт.	1	190
LCD дисплей LM044L	Шт.	1	300
Транзистор IRF630	Шт.	1	40
Текстолит 200x200	Шт.	1	160
Хлорное железо 250 г	Шт.	1	200
Пружины	Шт.	3	150
Стальные диски	Шт.	2	300
Подшипники	Шт.	3	60
Стальная спица	Шт.	1	50
Электромотор	Шт.	2	300
Клемные соединения	Шт.	10	150
Итого (руб.)			100 253р.

4.4.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату (формула 18):

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (18)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{осн}$).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле 19:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (19)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

при отпуске в 72 раб. дней $M = 9,6$.

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 10).

Таблица 10 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	119	119
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48	72
Действительный годовой фонд рабочего времени	198	174

Месячный должностной оклад работника (формула 20):

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (20)$$

где Z_{tc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от Z_{tc});

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20% от Z_{tc});

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 11.

Таблица 11 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Z_{tc} , руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	$T_{р,раб. дн.}$	$Z_{осн.руб.}$
Руководитель	27 484	1,3	57 166,72	3 233	15	48 495
Студент	1 692	1,3	2 200	131	196	25 676

4.4.3 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата включает заработную плату за не отработанное рабочее время, но гарантированную действующим законодательством.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по формуле 21:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (21)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

$k_{\text{доп}}$ равен 0,12. Результаты по расчетам дополнительной заработной платы сведены в таблицу 12.

Таблица 12 – Затраты на дополнительную заработную плату

Исполнители	Основная зарплата (руб.)	Коэффициент дополнительной заработной платы ($k_{\text{доп}}$)	Дополнительная зарплата (руб.)
Руководитель	48 495	0,12	5 819,5
Студент	25 676	0,12	3 081,12
Итого:			8 900,62

4.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из формулы 21:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (21)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2017 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2017 году пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	48 495	5 819,5
Студент	25 676	3 081,12
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	30%	
Итого		
Руководитель	16 294,35	
Студент	8 627,136	

4.4.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 14.

Таблица 14 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	
	Руководитель	Студент
1. Материальные затраты НИИ	67 500	32 753
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	48 495	25 676
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	5 819,5	3 081,12
4. Отчисления во внебюджетные фонды	16 294,35	8 627,136
Бюджет затрат НИИ	138 108,85	70 137,26

Финансирование проекта осуществлялись путем частичного финансирования ТПУ, а именно предоставлением помещений и оборудования (осциллограф, генератор импульсов и т.п.), а также использованием личного ПК и иных личных ресурсов.

4.4.6 Определение ресурсной, финансовой и экономической эффективности исследования

Финансовые ресурсы, затраченные на данное исследование, составляют порядка 208 246 рублей, что является отличным результатом для создания обучающего стенда ПИД-регулятора. Приняв во внимание все преимущества

предложенного стенда, можно уверенно сказать, что в настоящее время, когда существует проблема с образовательной материальной базой в сфере автоматике, стенд такого типа будет обладать спросом. Также с приобретением опыта изготовления стендов и переходом к использованию более дорогих и надежных компонентов возможно устранение угроз (описанных в SWOT-анализе) Появление репутации на рынке также благоприятно повлияет на успешность всего проекта. Таким образом, экономическая эффективность будет иметь высокий результат с наименьшими затратами. В настоящее время проект находится на стадии тестирования опытного образца на кафедре СУМ ИК ТПУ.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8Т31	Селивёрстову Павлу Андреевичу

Институт	Кибернетики	Кафедра	СУМ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Помещение закрытого типа с естественной вентиляцией воздуха. Помещение имеет как искусственный, так и естественный источник освещения. Основное рабочее оборудование – ПЭВМ.</p> <p>Вредные факторы производственной среды: недостаточное освещение, повышения уровня шума, микроклимат, превышение электромагнитных и ионизирующих излучений, монотонный режим работы.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Опасные факторы среды: электрический ток, влияние на зрение. - Негативное влияние на окружающую среду: бытовые отходы. - Чрезвычайные ситуации: пожар
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ производственных факторов при работе на ПК:</p> <ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). 	<p>Так как вся работа персонала заключена в работе с ПЭВМ, то и вредные факторы возникают из-за ПЭВМ:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Электромагнитное и ионизирующее излучения отрицательно влияют на иммунную, нервную, эндокринную системы. Согласно требованиям СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03: Напряженность электрического поля в диапазоне частот 5 Гц– 2 кГц не должна превышать 25 В/м, а в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц не больше 2,5 В/м. Плотность магнитного потока в диапазоне частот 5 Гц– 2 кГц не должна превышать 250 нТл, а в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц не больше 2,5 нТл. - Шум негативно влияет на психофизиологическое состояние. Согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96: При нахождении на рабочем месте в процессе трудовой деятельности на ПЭВМ уровень звукового давления не должен превышать 80 дБА. <p>Электробезопасность осуществляется в соответствии с ГОСТ Р 12.1.019 – 2009.</p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); 	<p>Влияние на экологическую безопасность небольшое. Предметами воздействия на окружающую среду могут выступить лишь бытовые отходы (части электронных устройств и т.д.)</p>

<ul style="list-style-type: none"> – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>Наиболее типичная ЧС для объекта исследования – пожар.</p> <p>Для предотвращения и предупреждения ЧС должны быть установлены устройства сигнализации, датчики загазованности и дыма. В процессе эксплуатации объекта персонал обязан соблюдать технику безопасности. При возникновении ЧС персонал обязан следовать плану эвакуации, а также вызвать пожарных.</p>
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Право на условия труда, отвечающие требованиям безопасности и гигиены. Использование оборудования и мебели согласно антропометрическим факторам.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. ЭБЖ	Пустовойтова Марина Игоревна	к.х.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8Т31	Селивёрстов Павел Андреевич		

5. Социальная ответственность

В данном разделе выпускной квалификационной работы рассматриваются вопросы анализа вредных и опасных факторов труда, разрабатываются меры защиты от вредных и опасных производственных факторов для рабочего места в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, а также даются рекомендации по созданию оптимальных условий труда и охране окружающей среды.

В рамках ВКР рассматривается стенд ПИД-регулятора, в состав которого входят аналоговый и дискретный ПИД-регуляторы, механический и аналоговый электрический объекты управления и источник задающего воздействия. Данный стенд предназначен для приобретения практических навыков натурной настройки ПИД-регуляторов студентами профильных специальностей при работе как с аналоговым электрическим, так и с механическим объектом управления. Цель дипломной работы – реализовать материальную базу в виде стенда ПИД-регулятора, который позволит повысить уровень профессиональных компетенций студентов профильных специальностей.

Во время работы персонал может быть подвержен влиянию следующих факторов:

1. Аэроионный состав воздуха.
2. Параметры микроклимата.
3. Уровень статического электричества.
4. Уровень электромагнитных излучений.
5. Отсутствие или недостаток естественного света.
6. Режим освещения.
7. Прямая и отраженная блёскость.
8. Уровень шума.
9. Монотонность труда.
10. Умственное перенапряжение.

5.1 Производственная безопасность

Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" [11] устанавливают требования безопасности к ПК, к помещениям для работы с ПК: к микроклимату, уровню шума и вибрации, освещенности, уровню электромагнитных полей на рабочем месте, общие требования к организации рабочих мест: расположение видео дисплейного терминала, конструкция стола и кресла/стула.

5.2 Требования к ВДТ

В таблице 15 укажем требования СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 к ВДТ и реальные значения, отражающие параметры объекта:

Таблица 15 – Требования к видеодисплейному терминалу.

Параметр	Допустимые значения
Яркость белого поля	Не менее 35 кд/м ²
Неравномерность яркости рабочего поля	Не более ± 20 %
Контрастность (для монохромного режима)	Не менее 3 : 1
Временная нестабильность изображения (мелькание)	Не должна фиксироваться

5.3 Микроклимат производственных помещений

Микроклимат помещения определяется тремя основными параметрами:

- температура окружающего воздуха, °С;
- относительная влажность воздуха, %;
- скорость движения воздуха, м/с;

Комфортность труда и высокая производительность работающего зависит от микроклимата в помещении. Микроклимат определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры,

относительной влажности и скорости движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата, согласно СанПиН 2.2.4.548–96 [12] приведены в таблице 16:

Таблица 16 – Допустимые и оптимальные параметры микроклимата.

Сезон	Температура, С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	22-24	40-60	до 0,1
Тёплый	23-25	40-60	0,1-0,2

Оптимальные условия микроклимата обеспечивают комфортную работу трудящегося, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, поддерживают высокий уровень работоспособности.

Работа персонала в данном случае относится к категории работ I а, с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч. Работы производятся сидя и сопровождаются незначительным физическим напряжением.

Нормальные значения параметров микроклимата в помещении, где находится рабочее место в течение всего года поддерживаются, благодаря установленному кондиционеру и центральному отоплению, а также вентиляции помещения.

5.4 Производственный шум

Во время работы персонал подвержен влиянию производственного шума, издаваемого офисной техникой. В результате происходит снижение производительности труда, увеличивается брак в работе, создаются предпосылки к возникновению несчастных случаев.

Требования к уровню шума регламентируются СанПин 2.2.4/2.1.8.562-96 [13] и уровень шума составляет не более 80 дБа.

В качестве мер по снижению шума применяют:

- подавление шума в источниках;
- звукоизоляция и звукопоглощение;
- увеличение расстояния от источника шума;

- проверка технического состояния и ремонт системного блока и принтера;
- рациональный режим труда и отдыха.

5.5 Электромагнитные и электрические поля

Рабочее место инженера-проектировщика подвержено влиянию электромагнитных полей (ЭМП). Источниками ЭМП является офисное оборудование, в частности компьютеры (ЭВМ).

Большая часть электромагнитного излучения, создаваемого ЭВМ, происходит от видеокабеля и системного блока. В составе современных персональных компьютеров практически все электромагнитное излучение идет от системного блока. Современные компьютеры выпускаются производителями со специальной металлической защитой внутри системного блока для уменьшения фона электромагнитного излучения.

Электромагнитное поле обладает способностью биологического, специфического теплового воздействия на организм человека. При воздействии полей, имеющих напряженность выше предельно допустимого уровня, развиваются нарушения со стороны нервной, сердечнососудистой систем, органов пищеварения и некоторых биологических показателей крови.

Степень воздействия электромагнитных излучений на организм человека зависит от диапазона частот, интенсивности воздействия соответствующего фактора, продолжительности облучения, характера излучения, режима облучения, размеров облучаемой поверхности тела и индивидуальных особенностей организма человека.

Критерием безопасности для человека, находящегося в электрическом поле промышленной частоты, принята напряжённость этого поля. Гигиенические нормы для персонала, который систематически находится в этой зоне, установлены ГОСТ Р 12.1.019-2009 [14].

Использование современной офисной техники позволяет избежать повышенных электромагнитных и электрических полей.

Возможные способы защиты от ЭМП на путях распространения:

- применение поглотителей мощности;
- увеличение расстояния от источника излучения;
- уменьшение времени пребывания в поле и под воздействием излучения;
- подъем излучателей и диаграмм направленности излучения;
- блокировочные излучения;
- экранирование излучений.

5.6 Ионизирующее излучение

Основным источником ионизирующего излучения является дисплей компьютера (ЭВМ).

Ионизирующее излучение может вызывать торможение функций кроветворных органов, нарушение нормальной свертываемости крови и увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение сопротивляемости организма к инфекционным заболеваниям.

Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. Конструкция ПЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы мягкого рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана и корпуса не более 1 мкЗв/час (100 мкР/час).

При защите от внешнего облучения, возникающего при работе с дисплеем, проводятся следующие мероприятия:

- для обеспечения оптимальной работоспособности и сохранении здоровья на протяжении рабочей смены должны устанавливаться регламентированные перерывы – при 8-часовом рабочем дне продолжительностью 15 минут через каждый час работы;
- дисплей устанавливается таким образом, чтобы от экрана до оператора было не менее 60-70 см;
- должны использоваться дисплеи со встроенными защитными экранами.

Для мониторов рекомендуется следующее дооснащение:

- защитный фильтр для экрана, ослабляющий переменное электрическое и электростатическое поля;

- для одиночных ЭВМ или их однорядном расположении – специальное защитное покрытие на переднюю панель и боковые стенки;

- при многорядном расположении ЭВМ, если соседние рабочие места располагаются близко друг к другу (на расстоянии 1,2...2,5 м) – защитное покрытие задней и боковых стенок, монтирование специальных экранирующих панелей с задней и боковых сторон монитора, установка перегородок между различными пользователями.

Разработана технология защиты от электростатических, переменных электрической и магнитной составляющих ЭМИ путем нанесения электропроводных покрытий на внутреннюю поверхность корпуса монитора и его заземления, встраивания в дисплей оптического защитного фильтра, защищающего от излучений со стороны экрана.

При выполнении дипломной работы использовались жидкокристаллические мониторы с низким уровнем излучения. Все ЭВМ были расположены на отдельных столах за перегородками, следовательно, все требования нормативной документации были выполнены.

5.7 Электробезопасность

В помещении, где происходит выполнение работы, находится 8 ЭВМ мощностью по 350 Вт с напряжением питания 220 В.

В целом, помещение сухое, непыльное, с нормальной температурой воздуха и поэтому относится к классу помещений без повышенной опасности: переключатели, кнопки и разъемы, клавиатура изолированы, пол покрыт электроизоляционным покрытием. Корпус ЭВМ изготовлен из металлического листа, обладает высокой механической прочностью и высокими экранирующими свойствами, покрыт токонепроводящими полимерными пластмассами. Компьютер подключен к заземляющему контуру.

Электрические изделия по способу защиты человека от поражения электрическим током подразделяются на пять классов: 0, 01, 1, 2, 3.

ЭВМ можно отнести к классу 01, то есть, к изделиям, имеющим рабочую изоляцию, элемент для заземления и провод без заземляющей жилы для присоединения к источнику питания. При начале работы с ЭВМ необходимо проверить герметичность корпуса, не открыты ли токоведущие части. Убедиться в подключении заземляющего проводника к общей шине заземления, проверить его целостность. Если заземляющий проводник отключен, подключать его можно только при отключении машины от питающей сети. Для повышения безопасности работать можно с использованием резиновых ковриков.

Важность для предотвращения электротравматизма имеет правильная организация обслуживания действующих электроустановок, проведение ремонтных, монтажных и профилактических работ.

К мероприятиям по предотвращению возможности поражения электрическим током следует отнести:

- при производстве монтажных работ необходимо использовать только исправный инструмент, аттестованный службой КИПиА;
- с целью защиты от поражения электрическим током, возникающим между корпусом приборов и инструментом при пробое сетевого напряжения на корпус, корпуса приборов и инструментов должны быть заземлены;
- при включенном сетевом напряжении работы на задней панели должны быть запрещены;
- все работы по устранению неисправностей должен производить квалифицированный персонал;
- постоянный контроль над состоянием электропроводки.

5.8 Экологическая безопасность

Сегодня проблема загрязнения окружающей среды приобретает глобальный характер. И атмосфера, и гидросфера загрязнены токсичными веществами, созданными человеком. Человечество должно разрабатывать и

совершенствовать инженерно-технические средства защиты окружающей среды, развивать основы создания замкнутых, безотходных и малоотходных производств. Современная техника и технологии позволяют сократить выбросы вредных и токсичных веществ в окружающую среду, однако для обеспечения экологии на долгосрочный период времени требуется постоянно совершенствовать технологии добычи, потребления, переработки сырья, использования и утилизации оборудования.

Мероприятия по защите окружающей среды:

- В офисной среде необходимо использовать системы электронного документооборота. Это поможет избежать излишнего потребления бумаги, чернил и, соответственно, их утилизации.
- Вышедшие из строя детали компьютеров и других технических приборов следует отправлять на утилизацию.
- При проектировании технологически установок следует выбирать наиболее безопасные и экологичные материалы.
- Необходимо выключать приборы и установки после работы с ними, чтобы уменьшить потребление электроэнергии, а также исключить влияние вредных и опасных факторов, связанных с прибором (установкой).

Одной из серьезных проблем современности является масштабное потребление электроэнергии. С увеличением количества компьютерных систем, внедряемых в производственную сферу, увеличивается и объем потребляемой ими электроэнергии, что влечет за собой увеличение мощностей электростанций и их количества. И то, и другое не обходится без нарушения экологической обстановки.

Таким образом, очевидно, что необходимо стремиться к снижению энергопотребления, то есть разрабатывать и внедрять системы с малым энергопотреблением.

5.9 Пожарная безопасность

Одной из наиболее важных задач пожарной защиты является защита строительных помещений от разрушений и обеспечение их достаточной прочности в условиях воздействия высоких температур при пожаре. Учитывая высокую стоимость электрооборудования, а также категорию его пожарной опасности, здания для офиса, в котором предусмотрено размещение рабочего места, должны быть 1 и 2 степени огнестойкости.

Для изготовления строительных конструкций используются, как правило, кирпич, железобетон, стекло, металл и другие негорючие материалы. Применение дерева должно быть ограничено, а в случае использования необходимо пропитывать его огнезащитными составами. В офисе противопожарные преграды в виде специальных перегородок из негорючих материалов устанавливают между кабинетами.

К средствам тушения пожара, предназначенных для локализации небольших возгораний, относятся пожарные стволы, внутренние пожарные водопроводы, огнетушители, сухой песок, асбестовые одеяла и т. д.

Для тушения пожаров на начальных стадиях широко применяются огнетушители. По виду используемого огнетушащего вещества огнетушители бывают, в основном, пенного, порошкового, углекислотного вида. В производственных помещениях вычислительных центров (ВЦ) применяются главным образом углекислотные огнетушители, достоинством которых является высокая эффективность тушения пожара, сохранность электронного оборудования, диэлектрические свойства углекислого газа, что позволяет использовать эти огнетушители даже в том случае, когда не удается обесточить электроустановку сразу.

Помещение оборудовано датчиками пожарной сигнализации, реагирующие на появление дыма. В рабочем помещении вывешены «Планы эвакуации людей при пожаре», регламентирующие действия персонала в случае возникновения очага возгорания и указывающий места расположения пожарной техники. В необходимых местах размещены ручные огнетушители.

Средством оповещения сотрудников о пожаре служит пожарная сигнализация.

Для предупреждения возникновения пожара необходимо соблюдать следующие правила пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;

Необходимо в офисном помещении проводить следующие пожарно-профилактические мероприятия:

- организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта;
- эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования;
- технические и конструктивные, связанные с правильным размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов.

Организационные мероприятия:

- противопожарный инструктаж обслуживающего персонала;
- обучение персонала правилам техники безопасности;
- издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.

Эксплуатационные мероприятия;

- соблюдение эксплуатационных норм оборудования;
- обеспечение свободного подхода к оборудованию.
- содержание в исправности изоляции токоведущих проводников.

Технические мероприятия:

- соблюдение противопожарных мероприятий при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения.
- В офисном помещении имеется порошковый огнетушитель типа ОУ-8, на входной двери приведен план эвакуации в случае пожара, и на досягаемом расстоянии находится пожарный щит.

- профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

Кроме устранения самого очага пожара, нужно своевременно организовать эвакуацию людей.

При возникновении пожара каждый обнаруживший пожар обязан:

1. Немедленно сообщить об этом в пожарную охрану по телефону 01.
2. Сообщить о случившемся дежурному персоналу.
3. Оказать помощь дежурному персоналу в организации эвакуации людей из здания и тушении пожара

5.10 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Предъявляемые требования к расположению и компоновке рабочего места. Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах (630-1020) мм, при отсутствии конкретных условий высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм [15].

Модульными размерами рабочей поверхности стола для ПК, на основании которых должны рассчитываться конструктивные размеры, следует считать: ширину 800, 1000, 1200 и 1400 мм, глубину 800 и 1000 мм при нерегулируемой его высоте, равной 725 мм.

Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм [15].

Конструкция рабочего стула должна обеспечивать:

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400-550 мм и углам наклона вперед до 15 град, и назад до 5 град;
- высоту опорной поверхности спинки (300±20) мм, ширину – не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости –400 мм;

- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах ± 30 градусов;
- регулировку расстояния спинки от переднего края сиденья в пределах (260 400) мм;
- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250мм и шириной –(50 70) мм;
- регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах(230 \pm 30) мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах (350 500) мм.

Рабочее место пользователя ПК следует оборудовать подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20°. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии (100-300) мм от края, обращенного к пользователю или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии (600-700 мм), но не ближе 500 мм.

При работе за компьютером, необходимо проводить влажную уборку помещения ежедневно. Недопустима запыленность воздуха, пола, рабочей поверхности стола и техники. Помещение должно быть оборудовано системами вентиляции, кондиционирования и отопления. Запрещается работа на компьютере и за паяльной станцией в подвальных помещениях.

Заключение

В результате выполненной работы был разработан стенд ПИД-регулятора, в частности, были разработаны схема АЭОУ третьего порядка; аналогового ПИД-регулятора; библиотека дискретного ПИД-регулятора; модуля ШИМ-питания МехОУ. А также были приведены чертежи соединительных втулок механического объекта управления, и принцип получения трехмассового объекта.

Проведено как компьютерное (в среде MATLAB&Simulink), так и физическое моделирование (на макетной плате с применением осциллографа) аналогового ПИД-регулятора вместе с аналоговым электрическим объектом управления.

Также было реализовано математическое моделирование работы ПИД-регулятора с механическим объектом управления в пакете MATLAB&Simulink.

Разработанная библиотека ПИД-регулятора так же была подвергнута моделированию, результаты которого подтвердили работоспособность и правильность выполнения алгоритмов ПИД-регулирования.

Таким образом, разработанный стенд ПИД-регулятора может выступать в роли необходимой материальной образовательной базы для студентов профильных специальностей для получения высокого уровня профессиональных компетенций в сфере автоматике.

Список используемых источников

1. Малышенко А.М. Математические основы теории систем. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2004. – 334 с.
2. Пякилля Б.И. Идентификация математической модели робототехнической системы // Математические структуры и моделирование. 2014. № 4 (32). С. 100-104.
3. А.Т. Газизов, И.А. Тутов. Разработка электронного стенда изучения ПИД-регулятора // Автоматика и программная инженерия, № 2, 2016. С. 14-19.
4. Экспресс-анализ САР по ее передаточной функции // Сайт о моделировании систем и явлений URL: http://model.exponenta.ru/bt/bt_00111.html (дата обращения: 07.05.2017).
5. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия– Телеком, 2013 – 608 с
6. Основы теории цепей: Учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
7. AVR221: Discrete PID controller [Электронный ресурс] // Atmel: [сайт]. URL: http://atmel.com/Images/Atmel-2558-Discrete-PID-Controller-on-tinyAVR-and-megaAVR_ApplicationNote_AVR221.pdf (дата обращения: 07.05.2017).
8. PIDLibrary [Электронный ресурс] // Arduino Playground: [сайт]. URL: <http://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary> (дата обращения: 07.05.2017).
9. Improving the Beginner's PID – Introduction [Электронный ресурс] // Project Blog: [сайт]. URL: <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction/> (дата обращения: 07.05.2017).
10. Arduino [Электронный ресурс] // Википедия: [сайт]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Arduino> (дата обращения: 07.05.2017).
11. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // В записную книжку инженера, № 4, 2007. С. 86-97.

12. Improving the Beginner's PID: Reset Windup [Электронный ресурс] // Project Blog: [сайт]. URL: <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginner%E2%80%99s-pid-reset-windup/> (дата обращения: 07.05.2017)
13. Derivative Kick [Электронный ресурс] // Project Blog: [сайт]. URL: <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginner%E2%80%99s-pid-derivative-kick/> (дата обращения: 07.05.2017).
14. Improving the Beginner's PID: Tuning Changes [Электронный ресурс] // Project Blog: [сайт]. URL: <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginner%E2%80%99s-pid-tuning-changes/> (дата обращения: 07.05.2017)
15. Широтно-импульсная модуляция [Электронный ресурс] // Википедия: [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Широтно-импульсная_модуляция (дата обращения: 07.05.2017).
16. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно- вычислительным машинам и организации работы"
17. СанПиН 2.2.4.548-96 "Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений".
18. Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96 "Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки"
19. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
20. ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Заголовочный файл библиотеки

```
1. /** Range of allowed PID output range. Needed to avoid sign/overflow problems. */
2. #define DEFAULT_MIN_OUT 0
3. #define DEFAULT_MAX_OUT 255
4.
5. /** Sample time in seconds.
6.  * How often PID control function (pid_Controller) will be called.
7.  * Important setting dependent on timer implementation in your program.
8.  */
9. #define SAMPLE_TIME 2e-3
10.
11. /** Parameters for initializing */
12. #define INITIAL_INTEGRAL_TERM 0
13.
14. /** Library functions declaration */
15. void pid_Init(double p_factor, double i_factor, double d_factor, int16_t processValue);
16. void pid_setParams(double Kp, double Ki, double Kd);
17. void pid_setOutputLimits(int16_t Min, int16_t Max);
18. double pid_Controller(int16_t setPoint, int16_t processValue);
```

Основной файл с реализацией библиотеки

```
1.  #include "stdint.h"
2.  #include "pid.h"
3.
4.  /** Structure for storing PID data between calculations */
5.  typedef struct PID_DATA {
6.      int16_t lastProcessValue;
7.      int32_t integralTerm;
8.      double kp;
9.      double ki;
10.     double kd;
11.     int16_t MAX_OUT;
12.     int16_t MIN_OUT;
13. } pidData_t;
14.
15. struct PID_DATA pidData;
16.
17. /* PID controller initialization. Should be called only once.
18.  * @param kp - proportional coefficient.
19.  * @param ki - integral coefficient.
20.  * @param kd - differential coefficient.
21.  */
22. void pid_Init(double kp, double ki, double kd, int16_t processValue)
23. {
24.     pidData.integralTerm = INITIAL_INTEGRAL_TERM;
25.     pidData.lastProcessValue = processValue;
26.     pid_setParams(kp, ki, kd);
27.     pid_setOutputLimits(DEFAULT_MIN_OUT, DEFAULT_MAX_OUT);
28. }
29.
30. /* Main PID controller function. It should be called regularly, each SAMPLE_TIME sec.
31.  * @param setPoint - level desired at output of the control object.
32.  * @param processValue - level obtained from the control object.
33.  * @returns input to control object.
34.  */
35. double pid_Controller(int16_t setPoint, int16_t processValue)
36. {
37.     double error, p_term, d_term;
38.     double out;
39.
40.     error = setPoint - processValue;
41.
```

```

42. pidData.integralTerm += pidData.ki * error;
43. if (pidData.integralTerm > pidData.MAX_OUT) {
44.     pidData.integralTerm = pidData.MAX_OUT;
45.     out = pidData.MAX_OUT;
46. } else {
47.     d_term = pidData.kd * (processValue - pidData.lastProcessValue);
48.     p_term = pidData.kp * error;
49.     out = (p_term + pidData.integralTerm - d_term);
50.     if (out > pidData.MAX_OUT) {
51.         out = pidData.MAX_OUT;
52.     } else if (out < pidData.MIN_OUT){
53.         out = pidData.MIN_OUT;
54.     }
55. }
56. pidData.lastProcessValue = processValue;
57.
58. return out;
59. }
60.
61. /** Restricts PID controller output.
62. * @param Min - minimal allowed output value.
63. * @param Max - maximal allowed output value.
64. */
65. void pid_setOutputLimits(int16_t Min, int16_t Max)
66. {
67.     if(Min > Max) return;
68.     pidData.MIN_OUT = Min;
69.     pidData.MAX_OUT = Max;
70. }
71.
72. /** Set PID controller params with consideration of sampling time.
73. * @param Kp - proportional coefficient.
74. * @param Ki - integral coefficient.
75. * @param Kd - differential coefficient.
76. */
77. void pid_setParams(double Kp, double Ki, double Kd)
78. {
79.     if (Kp<0 || Ki<0 || Kd<0) return;
80.
81.     pidData.kp = Kp;
82.
83.     pidData.ki = Ki * SAMPLE_TIME;
84.     pidData.kd = Kd / SAMPLE_TIME;
85. }

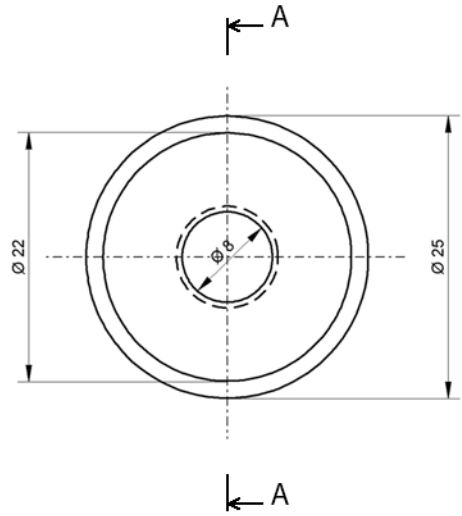
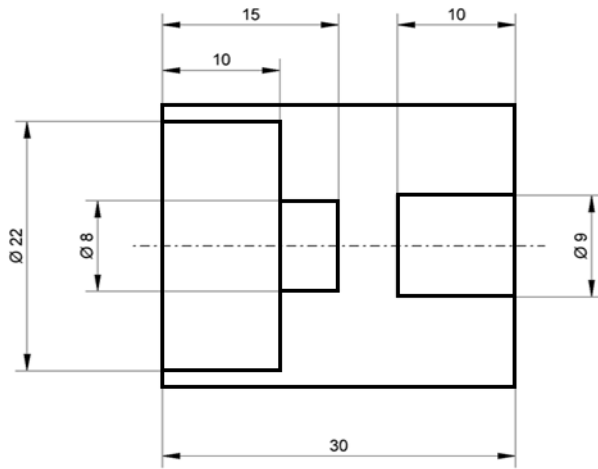
```


Пример основной программы для AVR МК ATmega16a

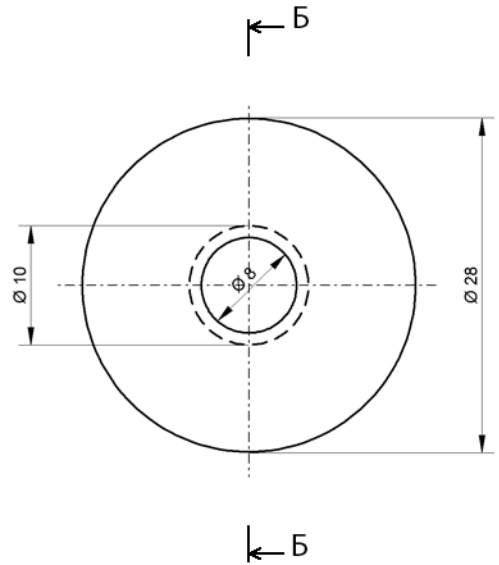
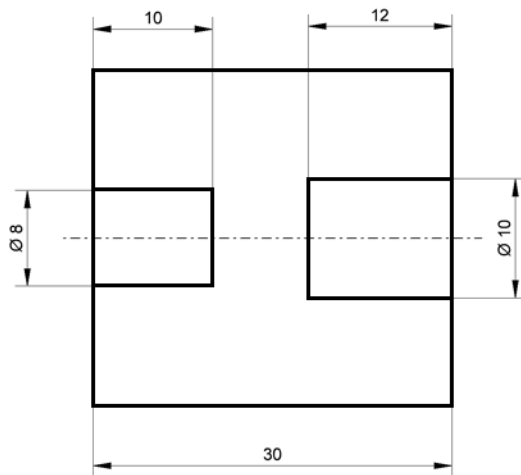
```
1.  #include <avr/io.h>
2.  #include <util/delay.h>
3.  #include <avr/interrupt.h>
4.  #include <pid.h>
5.
6.  /** CPU frequency */
7.  #define F_CPU 4000000
8.
9.  /** PID controller coefficients */
10. double K_P = 1;
11. double K_I = 0;
12. double K_D = 0;
13.
14. /** Global variables */
15. volatile uint16_t referenceValue, measurementValue, PID_out;
16.
17. /** Timer interrupt to control the sampling interval */
18. ISR (TIMER0_COMP_vect) {
19.     cli();
20.     referenceValue = readADC(0);
21.     measurementValue = readADC(1);
22.     PID_out      = pid_Controller(referenceValue, measurementValue);
23.     setPWMDuty(PID_out);
24.     sei();
25. }
26.
27. /** Timer interrupt initialization */
28. void initTimer0() {
29.     TCNT0 = 0; // initial value
30.     TCCR0 = 1 << CS01; // frequency F_CPU/8
31.     OCR0 = 255; // can be used to adjust velocity.
32.     TIMSK = 1 << OCIE0; // interrupt on compare
33. }
34.
35. void init () {
36.     sei();
37.     initADC();
38.     measurementValue = readADC(1);
39.     pid_Init(K_P, K_I, K_D, measurementValue);
40.     initTimer0();
41.     initPWM(0);
42. }
43.
44. int main(void)
45. {
46.     init();
47.     while(1) {}
48. }
```

Альбом схем

A-A



Б-Б

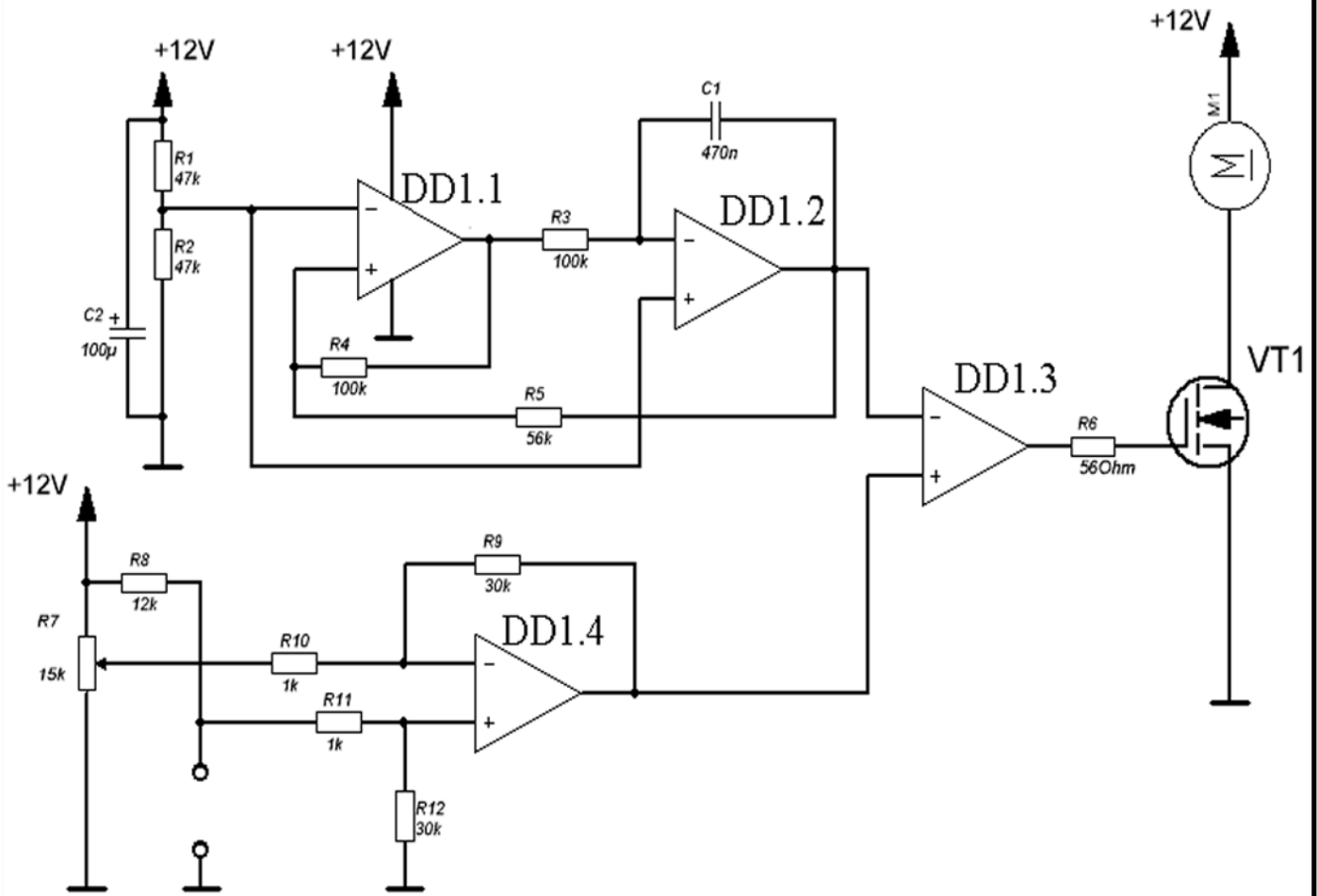


Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Селивёрстов		
Пров.		Рудницкий		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

ФЮРА.713121.010

**Соединительные
втулки**

Лит.	Масса	Масштаб
у		
Лист 1		Листов 3
ТПУ, ИК, Группа 8Т31		

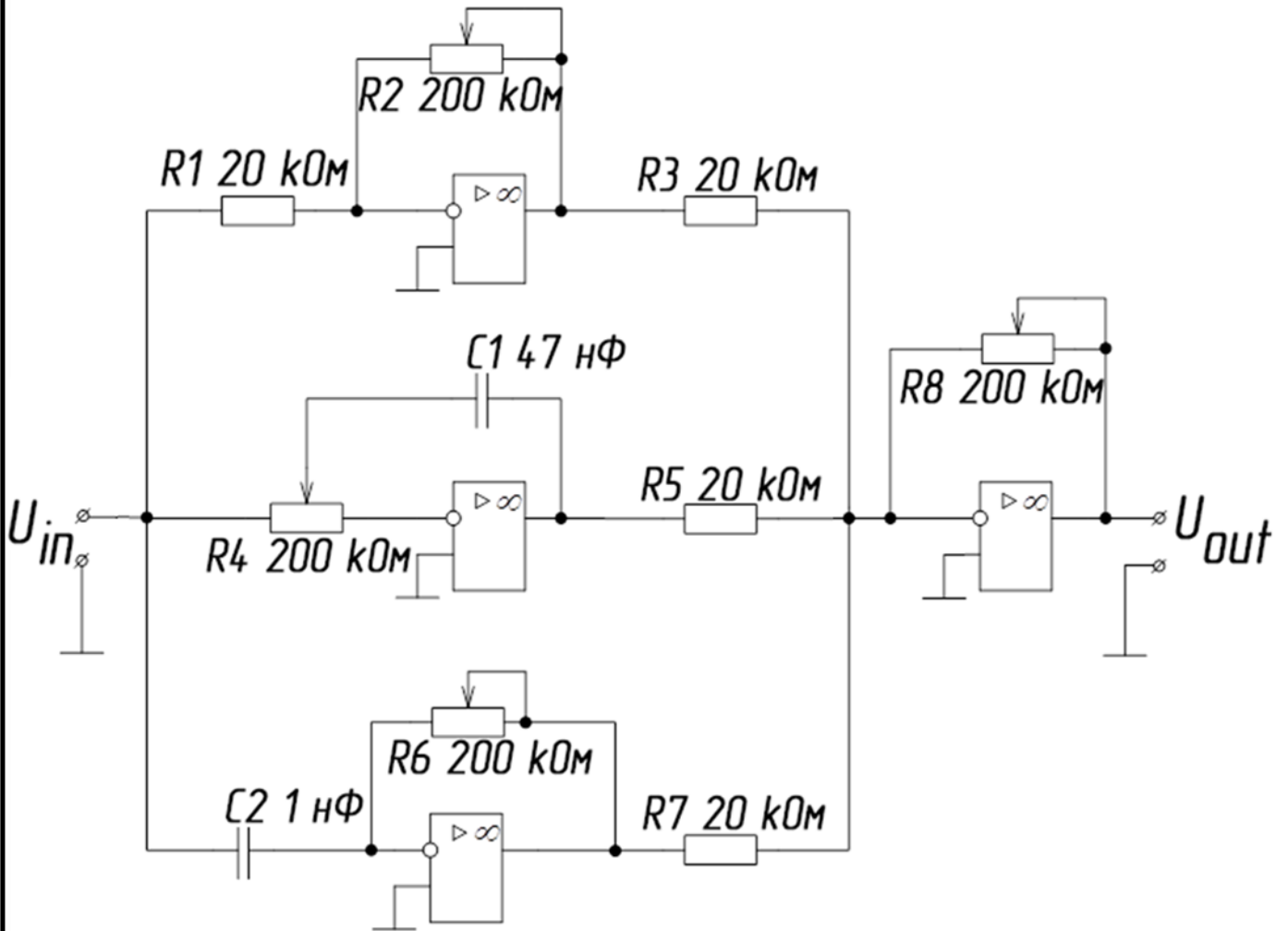


Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Селивёрстов		
Пров.		Рудницкий		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

ФЮРА.421212.010

Модуль ШИМ-питания

Лит.	Масса	Масштаб
у		
Лист 2		Листов 3
ТПУ, ИК, Группа 8Т31		



					ФЮРА.423115.010		
					Аналоговый ПИД-регулятор		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.		Селивёрстов			у		
Пров.		Рудницкий			Лист 3 / Листов 3		
Т.контр.					ТПУ, ИК, Группа 8Т31		
Н.контр.							
Утв.							